



Institut für Verkehrssicherheit
und Automatisierungstechnik **iva**

Untersuchung zur online abgesicherten Fahrer-Fahrzeug Interaktion in Kollisionsvermeidungs-Szenarien

Masterarbeit

erstellt von Michael Kaiser
Braunschweig, den 4. September 2017

Technische Universität Braunschweig
Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik
in Zusammenarbeit mit
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Verkehrssystemtechnik

Erstprüfer: Prof. Dr. Kasten Lemmer
Zweitprüfer: Dr. Uwe Becker
Betreuer: Daniel Heß



Aufgabenstellung für eine

Masterarbeit

Bearbeiter: Michael Kaiser

Matr.-Nr.: 4592783

Fakultät: Maschinenbau

Bearbeitungsdauer: 6 Monate

Erstprüfer: Prof. Dr. Ing. Karsten Lemmer

Betreuer: Daniel Heß

Hermann-Blenk-Str. 42
38108 Braunschweig
Deutschland

Tel. +49 (0) 531 391-66300
Fax +49 (0) 531 391-66399
sek@iva.ing.tu-bs.de
<http://www.iva.ing.tu-bs.de>

1. März 2017

Thema: Untersuchung zur online abgesicherten Fahrer-Fahrzeug Interaktion in Kollisionsvermeidungs-Szenarien (de) Driver-Vehicle Interaction and Online Safety Verification in Collision Avoidance Scenarios (en)

Im Rahmen der Forschungsarbeiten zur Online Absicherung von teil- und hoch-automatisierten Fahrzeugen im EU Projekt UnCoVerCPS wird eine Untersuchung zur Anwendbarkeit der Erreichbarkeitsanalyse in einem Kollisions-Vermeidungssystem mit Fahrerinteraktion durchgeführt.

Herr Kaiser hat die Aufgabe das mögliche Verhalten eines menschlichen Fahrers in einem kurzen, zukünftigen Zeitintervall zu modellieren und in der Berechnung des Sicherheitsnachweises für das teil- oder hoch-automatisierte Fahrzeug zu berücksichtigen. Es ist zu untersuchen, welche Einschränkungen für das menschliche Fahrverhalten durch die konservativen Annahmen im Sicherheitsnachweis entstehen.

Die Aufgabe von Herrn Kaiser umfasst im Einzelnen:

- Literaturrecherche und Erstellung eines Umsetzungskonzeptes
- Implementierung eines Prototypen in Matlab
- Durchführung der Untersuchung an Hand bestehender Versuchsdaten aus dem EU Projekt InteractIVe

	Datum	Unterschrift
Ausgabe der Arbeit	01.03.2017	
Abgabe der Arbeit	04.09.2017	

Unterschrift/Datum (Fakultät)

Stempel/Unterschrift/Datum

Unterschrift Erstprüfer

25.04.17 / D. Heß

Unterschrift Betreuer

25.4.17 / Kaiser

Unterschrift des Studierenden

Detaillierte Aufgabenstellung

Hoch- und Vollautomatisierte Fahrzeuge haben sehr hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Softwaresysteme und die korrekte Entscheidungsfindung der Planungs- und Regelungsmodule. Sie sind einer komplexen Umgebung ausgesetzt und müssen für eine große Anzahl Verkehrsszenarien einsatzfähig sein. Die große Anzahl Umgebungsvariablen in Kombination mit Nicht-Determinismen, die sich aus Sensorfehlern, unsicherer Fahrdynamik und dem unbekannten, zukünftigen Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer ergeben, stellt eine große Herausforderung für klassische Test- und Verifikationsmethoden dar.

Der Einsatz von Online-Verifikationsmethoden zur Absicherung der Entscheidungen des (hoch) automatisierten Fahrzeugs ist vielversprechend, da die Korrektheit für spezifische Situationen und somit für eingeschränkte Zustandsraumkombinationen nachgewiesen werden kann. Mit Hilfe konservativer Annahmen bezüglich der Sensorfehler, der während des Fahrprozesses auftretenden Störungen und des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer lassen sich formale Sicherheitsnachweise erzielen.

Eine interessante Fragestellung ist es, den formalen Sicherheitsnachweis vom rein technischen System auf die Interaktion des technischen Systems mit einem menschlichen Fahrer zu erweitern. Hierzu soll in der Masterarbeit ein Kollisionsvermeidungssystem untersucht werden, das die Fahraktionen des menschlichen Fahrers überwacht, im Notfall dem Fahrer die Kontrolle entziehen kann und dann durch kombiniertes Lenken und Bremsen das Fahrzeug in einen sicheren Zustand überführen kann. Im Gegensatz zu existierenden Studien wie etwa PRORETA soll die Berechnung des Auslösezeitpunktes und die folgende, automatisierte Steuerung des Fahrzeugs formale Sicherheitskriterien zu Grunde legen: Hierzu ist ein mengenbasiertes Modell der Handlungsoptionen des Fahrers zu erstellen, das für ein kurzes Zeitintervall in die Zukunft ausgewertet wird, um unter Annahme aller möglichen Fahrerinputs eine Erreichbarkeitsmenge für das Fahrzeugsystem zu bestimmen. Im Folgenden soll mit einem Tube-based MPC Ansatz bestimmt werden, ob ausgehend von der fahrer-gesteuerten Erreichbarkeitsmenge und unter Berücksichtigung aller möglicher Modellfehler und Messunsicherheiten das Fahrzeug sicher in den Stillstand überführt werden kann. Die Existenz eines solchen Manövers ist der Nachweis, dass der Fahrer für das betrachtete, zukünftige Zeitintervall die Steuerung des Fahrzeugs behalten darf. Falls zum aktuellen Zeitschritt kein Notfallmanöver berechnet werden kann, muss das Automationssystem in den Fahrprozess eingreifen und dem Fahrer teilweise oder ganz die Kontrolle entziehen. Die automatisierte Ausführung, des im letzten Zeitschritt berechneten Notfallmanövers muss dann möglich sein.

Gegenstand der Untersuchung ist es zuerst, den Grad der Konservativität des beschriebenen Verfahrens und damit die Einschränkung des Fahrers in seinem gewohnten Verhalten zu quantifizieren. Hier ist bezogen auf bestehende Versuchsdaten mit menschlichen Fahrern die Fehlauflösungsrate unterschiedlichen Berechnungsraten (Länge des Fahrer-Prädiktionsintervalls) gegenüberzustellen. Gegebenenfalls können nachfolgend unterschiedliche Interaktionsmechanismen untersucht werden, die dem Fahrer im Prädiktionsintervall den Handlungsspielraum nur teilweise einschränken. Z.B. könnte hier das Lenken in eine bestimmte Richtung oder eine positive Beschleunigungsänderung unterbunden werden.

Teilaufgaben:

- Erstellung eines mengenbasierten Modells für das Verhalten des Fahrers in einem kurzen Zeitintervall
- Implementierung eines Tube-based MPC Ansatzes in Matlab, mit Hilfe der Bibliotheken ACADO für die Trajektorienplanung und CORA für die Erreichbarkeitsanalyse
- Durchführung der Untersuchung zur vollständigen Kontrollübernahme durch die Automation an Hand der Daten der Interactive Studie
- Optional: Konzipierung und Untersuchung alternativer Interaktionsmechanismen
- Dokumentation der Vorgehensweise und der Ergebnisse

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit mit dem Titel „Untersuchung zur online abgesicherten Fahrer-Fahrzeug Interaktion in Kollisionsvermeidungs-Szenarien“, ohne unerlaubte fremde Hilfe oder Beratung und nur unter Verwendung der angegebenen wissenschaftlichen Hilfsmittel angefertigt habe.

Braunschweig, den 4. September 2017

Michael Kaiser

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XI
Symbolverzeichnis	XII
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik und Motivation	4
2.1 Gewährleistung des sicheren Betriebs von Kraftfahrzeugen	4
2.1.1 Testbasierte Absicherung	4
2.1.2 Formale Absicherung	5
2.2 Modellierung des menschliche Fahrverhaltens	5
2.2.1 Regelungsorientierte Fahrermodelle	6
2.2.2 Worst-case Fahrermodelle	6
2.3 Bestehende Fahrzeugmodelle am DLR	7
2.3.1 Dynamisches Einspurmodell	7
2.3.2 Dynamisches Einspurmodell mit linearem Regler	9
2.4 Trajektorienplanung	10
2.4.1 Formulierung und Lösung als Optimierungsproblem	10
2.4.2 Formulierung und Lösung als Graphensuche	13
2.5 Motivation	14
3 Verwendete Software und Daten	16
3.1 Softwarepakete	16
3.1.1 Optimierung	16
3.1.2 Erreichbarkeitsanalyse	17
3.2 Realstudie im Projekt interactIVe	17
3.2.1 Versuchsfahrzeug FAS-Car II	17
3.2.2 Durchführung und zur Verfügung stehende Daten	18
4 Parameter eines Modells der menschlichen Fahrzeugsteuerung	21
4.1 Ableitung der menschlichen Leistungsparameter aus Versuchsdaten . . .	21
4.1.1 Längsführung	21
4.1.2 Querverführung	24
4.2 Ableitung der Vermittlungsfunktionen aus Versuchsdaten	25
4.2.1 Längsführung	25
4.2.2 Querverführung	26

4.3	Bewertung und alternative Lösungen	28
5	Sichere Manöverplanung (unter Berücksichtigung des menschlichen Fahr- verhaltens)	32
5.1	Berechnung menschlichen Einflussvermögens	33
5.1.1	Zusammenführung des Fahrzeug- und Fahrermodells	33
5.1.2	Umsetzung in Matlab	36
5.2	Bestimmung einer sicheren Trajektorie in den Stillstand	37
5.2.1	Formulierung als Optimierungsproblem	37
5.2.2	Aufstellung der Kostenfunktion	38
5.2.3	Umsetzung in Matlab	42
5.3	Erreichbarkeitsanalyse der Trajektorie	44
5.3.1	Formulierung der Erreichbarkeitsanalyse	45
5.3.2	Umsetzung in Matlab	45
5.4	Überprüfung der Lösung auf Korrektheit	47
5.4.1	Überprüfung auf Einhaltung der maximalen Radkräfte	47
5.4.2	Überprüfung auf Überschneidung mit dem Hindernis	48
5.4.3	Umsetzung in Matlab	51
5.5	Zusammensetzung des Lösungsalgorithmus	52
6	Untersuchung des Absicherungskonzepts	55
6.1	Einfluss der Fahrermodellparameter auf die Erreichbarkeitsmenge	55
6.1.1	Einfluss der menschlichen Längsführung	56
6.1.2	Einfluss der menschlichen Querführung	58
6.1.3	Einfluss der kombinierten menschlichen Fahrzeugführung	59
6.1.4	Vergleich des Einflusses der verschiedenen Parameter auf die Er- reichbarkeitsmenge des Gesamtfahrzeuges	61
6.2	Bestimmung der Fehlauslöserate	62
6.2.1	Vorgehensweise	64
6.2.2	Gegenüberstellung verschiedener Vorausschauzeiten	65
6.3	Untersuchung anderer Interaktionsmechanismen	71
6.3.1	Beschränkung der Beschleunigungsänderung	72
6.3.2	Beschränkung des Lenkbereichs	74
7	Zusammenfassung und Ausblick	77
	Literatur	80

Anhang	87
A Versuchsaufbau der Realstudie im Projekt interactIVe	87
B Parameter für CORA bei der Berechnung	89
C Darstellung der Erreichbarkeitsmengen mit Hindernis für den Datensatz VP44 für die verschiedenen Untersuchungsarten	91
D Ergebnisse und Grund der Beendigung der Simulation für alle Datensätze	100
E Datenträger	106

Abbildungsverzeichnis

1	Lenkradwinkelverlauf im „fishhook-Test“	7
2	Fahrzeugkoordinatensystem im dynamischen Einspurmodell	8
3	Graph zur Trajektorienplanung mit möglichen Übergängen (schwarz) und Trajektorie (rot)	14
4	Versuchsfahrzeug FAS-Car II	18
5	Äußere Abmessungen des Versuchsfahrzeugs FAS-Car II	18
6	Hindernis in der zweiten Studie des Projekts interactIVe	19
7	Zeitlicher Verlauf des Eingriffs am Gaspedal und im Bremssystem	22
8	Phasenportraits Eingriff am Gaspedal und am Bremssystem	22
9	Pedalwechselzeit im Zeitverlauf	23
10	Histogramme der Pedalwechselzeiten	23
11	Lenkradwinkel über die Zeit für eine Realfahrt im Versuch	24
12	Phasenportrait Lenkradwinkel	25
13	Beschleunigung über Gaspedalstellung bzw. Bremsdruck	26
14	Lenkwinkel über Lenkradwinkel mit verschiedenen Approximationen	27
15	Fahrzeugbeschleunigung bzw. Fahrzeugruck über Geschwindigkeit im Be- reich Gaspedal betätigt	29
16	Fahrzeugbeschleunigung bzw. Fahrzeugruck über Geschwindigkeit im Be- reich kein Pedal betätigt	30
17	Fahrzeugbeschleunigung bzw. Fahrzeugruck über Geschwindigkeit im Be- reich Bremspedal betätigt	30
18	Simulationsablauf in Einzelschritten	32
19	Bereichsübergänge der verschiedenen Pedalbetätigungen	34
20	Beschleunigungseingabe über Zeit	34
21	Lenkwinkeleingabe über Zeit	35
22	Superellipsen verschiedenen Grades mit den Halbachsen r_a und r_b	39
23	Bildung Aufenthaltsraum des Gesamtfahrzeugs über Aufenthaltsbereiche bei verschiedenen Ausrichtungen	49
24	Erste Methode zum Prüfen auf Überschneidung mit dem Hindernis	49
25	Zweite Methode zum Prüfen auf Überschneidung mit dem Hindernis	50
26	Dritte Methode zum Prüfen auf Überschneidung mit dem Hindernis	51
27	Erreichbarkeitsmengen des Berechnungspunktes in der x-y-Ebene unter Längsführung bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h	56
28	Erreichbarkeitsmengen des Berechnungspunktes in der x-y-Ebene unter Längsführung bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h	57

29	Erreichbarkeitsmengen des Berechnungspunktes in der x-y-Ebene unter Querführung bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h	58
30	Erreichbarkeitsmengen des Berechnungspunktes in der x-y-Ebene unter Querführung bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h	59
31	Erreichbarkeitsmengen des Berechnungspunktes in der x-y-Ebene unter menschlicher Fahrzeugführung bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h . .	60
32	Erreichbarkeitsmengen des Berechnungspunktes in der x-y-Ebene unter menschlicher Fahrzeugführung bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h .	61
33	Erreichbarkeitsmengen des Gesamtfahrzeugs in der x-y-Ebene bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h	62
34	Erreichbarkeitsmengen des Gesamtfahrzeugs in der x-y-Ebene bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h	63
35	Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie zum Datenpunkt bei $t_{d1} = 0.00$ s aus dem Versuch von VP44 für 100 ms Vorausschauzeit	66
36	Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie zum Datenpunkt bei $t_{d12} = 0.55$ s aus dem Versuch von VP44 für 100 ms Vorausschauzeit	66
37	Erreichbarkeitsmengen und (ungültige) Trajektorien zum Datenpunkt bei $t_{d13} = 0.60$ s aus dem Versuch von VP44 für 100 ms Vorausschauzeit . . .	67
38	Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie zum Datenpunkt bei $t_{d13} = 0.60$ s aus dem Versuch von VP44 für 100 ms Vorausschauzeit	68
39	Erreichbarkeitsmengen und (ungültige) Trajektorie zum Datenpunkt bei $t_{d15} = 0.70$ s aus dem Versuch von VP44 für 100 ms Vorausschauzeit . . .	68
40	Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie zum Datenpunkt bei $t_{d1} = 0.00$ s aus dem Versuch von VP44 für 200 ms Vorausschauzeit	69
41	Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie zum Datenpunkt bei $t_{d10} = 0.45$ s aus dem Versuch von VP44 für 200 ms Vorausschauzeit	69
42	Erreichbarkeitsmengen und (ungültige) Trajektorie zum Datenpunkt bei $t_{d11} = 0.50$ s aus dem Versuch von VP44 für 200 ms Vorausschauzeit . . .	70
43	Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie zum Datenpunkt bei $t_{d1} = 0.00$ s aus dem Versuch von VP44 für 200 ms Vorausschauzeit und Beschränkung der Längsführung	72
44	Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie zum Datenpunkt bei $t_{d10} = 0.45$ s aus dem Versuch von VP44 für 200 ms Vorausschauzeit und Beschränkung der Längsführung	73
45	Erreichbarkeitsmengen und (ungültige) Trajektorie zum Datenpunkt bei $t_{d11} = 0.50$ s aus dem Versuch von VP44 für 200 ms Vorausschauzeit und Beschränkung der Längsführung	73

46	Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie zum Datenpunkt bei $t_{d1} = 0.00$ s aus dem Versuch von VP44 für 200 ms Vorausschauzeit und Beschränkung der Querführung	74
47	Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie zum Datenpunkt bei $t_{d10} = 0.45$ s aus dem Versuch von VP44 für 200 ms Vorausschauzeit und Beschränkung der Querführung	75
48	Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie zum Datenpunkt bei $t_{d11} = 0.50$ s aus dem Versuch von VP44 für 200 ms Vorausschauzeit und Beschränkung der Querführung	75
49	Versuchsstrecke des Realversuchs im Projekt interactIVe	87
50	Versuchsablauf der Situation mit drohender Kollision im Realversuch in der interactIVe Studie	88
51	Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie für alle untersuchten Datenpunkte aus dem Versuch von VP44 für 100 ms Vorausschauzeit	94
52	Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie für alle untersuchten Datenpunkte aus dem Versuch von VP44 für 200 ms Vorausschauzeit	96
53	Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie für alle untersuchten Datenpunkte aus dem Versuch von VP44 für beschränkte Beschleunigungsänderung des Fahrers und 200 ms Vorausschauzeit	98
54	Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie für alle untersuchten Datenpunkte aus dem Versuch von VP44 für beschränkten Lenkbereich des Fahrers und 200 ms Vorausschauzeit	99

Tabellenverzeichnis

1	Fahrzeugparameter des dynamischen Einspurmodells	9
2	Maximale Messfehler und Unsicherheiten im Konformitätstest des dynamischen Einspurmodells	9
3	Ergebnisse der zweiten Studie für das Projekt interactIVe	19
4	Parameter des erstellten Fahrermodells	31
5	Maximale Messfehler und Unsicherheiten für das in der Simulation verwendete Fahrzeugmodell	33
6	Für die Optimierung genutzte Gewichtungsfaktoren	44
7	Wahrheitsmatrix in der Untersuchung	63
8	Verhalten der Sicherheitsfunktion gegenüber dem Versuchsgeschehen bei 100 ms Vorausschauzeit	71
9	Parameter für CORA bei Berechnung des Fahrereinflusses	89
10	Parameter für CORA bei Berechnung der Erreichbarkeitsmengen entlang der Trajektorie	89
11	Ergebnisse und Grund der Beendigung der Simulation für alle Datensätze für Auswertung mit der Sicherheitsfunktion mit einem Fahrer-Prädiktionsintervall der Länge 100 ms	100
12	Ergebnisse und Grund der Beendigung der Simulation für alle Datensätze für Auswertung mit der Sicherheitsfunktion mit einem Fahrer-Prädiktionsintervall der Länge 200 ms	101
13	Ergebnisse und Grund der Beendigung der Simulation für alle Datensätze für Auswertung mit der Sicherheitsfunktion mit beschränktem Lenkbereich des Fahrers und einem Prädiktionsintervall der Länge 200 ms	103

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
a_x	m/s^2	Beschleunigung in Längsrichtung
A, B		Matrix
c_0		Zonotopenzentrum
c_f		Schräglaufsteifigkeit Vorderachse
c_r		Schräglaufsteifigkeit Hinterachse
c_x	m	x-Position Ellipsenzentrum
c_y	m	y-Position Ellipsenzentrum
d	m	Abstand
e		Unsicherheitsvektor
e_a	m/s^2	Unsicherheit Beschleunigungseingabe
e_{Fx}	m/s^2	Störkraft in Längsrichtung
$e_{Fy,f}$	m/s^2	Störkraft in Querrichtung an der Vorderachse
$e_{Fy,r}$	m/s^2	Störkraft in Querrichtung an der Hinterachse
e_v	m/s	Unsicherheit Geschwindigkeit
e_{vx}	m/s	Unsicherheit Geschwindigkeit in Längsrichtung
e_{vy}	m/s	Unsicherheit Geschwindigkeit in Querrichtung
e_x	m	Unsicherheit x-Position
e_y	m	Unsicherheit y-Position
e_δ	rad	Unsicherheit Lenkwinkleingabe
e_Ψ	rad	Unsicherheit Gierwinkel
e_Θ	rad	Unsicherheit Bewegungsrichtung
e_ω	rad/s	Unsicherheit der Gierrate
g	m/s^2	Ortsfaktor
g_i		Generatorenmatrix eines Zonotopen
g_p		p-te als Ungleichung formulierte Nebenbedingung
h_q		q-te als Gleichung formulierte Nebenbedingung
i, k, p, q		Laufvariable
K, P, Q		natürliche Zahl
K^*		Reglerverstärkung
J		Kostenwert
J_f		finale Kosten
J_r		laufende Kosten
J/m	m^2/s^2	normierte Gierträgheit
L	m	Radstand
m		Dimension des Zustandsvektors

n		Dimension des Steuerungsvektors
p_x	m	x-Position Berechnungspunkt
p_y	m	y-Position Berechnungspunkt
r	m	Ellipsenradius
r_a	m	1. Halbachse Ellipse
r_b	m	2. Halbachse Ellipse
s	%	skalierter Anteil übertragbarer Radkräfte
t	s	Zeit
T	s	Manöverdauer
u		Steuerungsvektor
U		Folge von Steuerungseingaben
v	m/s	Geschwindigkeit
v_x	m/s	Geschwindigkeit in Längsrichtung (Berechnungspunkt)
v_y	m/s	Geschwindigkeit in Querrichtung (Berechnungspunkt)
w		Störungsvektor
w_f		Gewichtungsfaktor finale Kosten
w_r		Gewichtungsfaktor laufende Kosten
x		Zustandsvektor
Z		Zonotop
\dot{x}		zeitliche Änderung des Zustandsvektors
δ	rad	Lenkwinkel
δ_L	rad	Lenkradwinkel
Θ	rad	Bewegungsrichtung
μ		Reibungskoeffizient
φ	rad	Winkelkoordinate
Ψ	rad	Gierwinkel
ω	rad/s	Gierrate
\mathcal{X}		Kombinierte Erreichbarkeitsmenge des Manövers
\mathcal{X}_i		Erreichbarkeitsmenge zum Zeitpunkt t_k

1 Einleitung

Die Absicherung hoch-automatisierter Fahrzeuge ist eine Herausforderung für deren Hersteller, da sie sicherstellen müssen, dass zu keiner Zeit die Sicherheit des eigenen Fahrzeugs sowie die Sicherheit anderer Verkehrsteilnehmer gefährdet ist. Bisher wurde die Sicherheit von Fahrfunktionen unter Zulassung einer Restunsicherheit vor allem durch Realfahrten mit Prototypen nachgewiesen. Auf Grundlage eines wahrscheinlichkeitsbasierten Modells, das die Anzahl der Verkehrstoten von automatisierten im Vergleich zu menschlich gesteuerten Fahrzeugen mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% auf ein Fünftel senken würde, wären etwa 8.8 Milliarden Testmeilen nötig, um die automatisierten Fahrfunktionen so abzusichern, dass sie durch entsprechend weniger Fehler machen als der Mensch [41].

Da eine testbasierte Absicherung somit sehr zeit- und kostenintensiv ist, gibt es Bestrebungen zur formalen Absicherung automatisierter Fahrzeuge. Dabei wird mit Hilfe mathematischer Methoden unter Annahme von Unsicherheiten (Messfehler, Modellfehler, Störungen und Anfangsbedingungen) nachgewiesen, dass das Fahrzeug stets sicher unterwegs ist. Hierfür wird gezeigt, dass es aus dem aktuellen Zustand durch einen entsprechenden Sicherheitsalgorithmus immer in einen sicheren Endzustand (z.B. Anhalten auf dem Seitenstreifen) gebracht werden kann. Findet diese Absicherung online statt, d.h. wird das Verhalten des Fahrzeugs im Betrieb auf Sicherheit überprüft, kann auch unerwartetes Geschehen im Sicherheitsnachweis berücksichtigt werden, so dass die Betriebssicherheit zur jedem Zeitpunkt gegeben ist. [28]

Zur Unterstützung des Menschen bei der Fahrzeugführung wurden und werden von den Automobilherstellern und ihren Zulieferern die verschiedensten Assistenzsysteme entwickelt. So hilft eine automatische Notbremse Kollisionen bei zu geringer Bremsung des Fahrers zu vermeiden oder zumindest abzuschwächen [16]. Mit Hilfe eines im Projekt Proreta entwickelten Assistenten zum Notausweichen wird der Fahrer dagegen beim Umfahren von Hindernissen unterstützt [62]. Über Methoden der formalen Absicherung kann der Sicherheitsnachweis für Assistenzsysteme auch ohne eine Vielzahl von Testkilometern erbracht werden, wie z.B. für einen Abstandsregeltempomat in [45]. Durch den steigenden Automatisierungsgrad im Fahrzeug können Fehler des Menschen immer besser ausgeglichen werden, bis zu einem Grad, dass der Fahrer (zumindest streckenweise) gar nicht mehr zur Fahrzeugführung gebraucht wird [66] und somit dabei, abgesehen von den entstehenden Automatisierungsrisiken wie Fehlbedienung, auch keine Fehler machen kann. Manche Studien deuten jedoch auf Ressentiments der Menschen gegenüber der vollständigen Abgabe der Kontrolle über den Fahrprozess hin [32]. Dies könnte eine verlängerte

Übergangszeit zum vollständig automatisierten Verkehr zu Folge haben, was eine längere Dauer von gemischtem Verkehr zwischen menschlich gesteuerten und automatisierten Fahrzeugen bedeutet. Während die Sicherheit im Zusammenspiel automatisierter Fahrzeuge z.B. in [29] gezeigt wurde, ist die Absicherung des Fahrzeugbetriebs von Fahrzeugen mit geteilter Kontrolle, d.h. mit möglichem Eingriff durch Fahrer oder Fahrzeugsystem, deutlich schwieriger [12]. Die formale Absicherung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle ist derzeit beispielsweise Gegenstand der Forschung im EU-Projekt UnVoVerCPS [63].

In dieser Arbeit soll ein online abgesichertes Kollisionsvermeidungssystem aufgebaut werden, wobei insbesondere der menschliche Fahrer einbezogen werden soll. Der Sicherheitsnachweis wird somit um die Mensch-Maschine-Interaktion von Fahrer und Fahrzeug erweitert. Da die Steuerungseingaben eines menschlichen Fahrers für zukünftige Zeitpunkte nicht mit abschließender Sicherheit abgeschätzt werden können, muss im Sicherheitsnachweis davon ausgegangen werden, dass - unabhängig von der Situation - der Fahrer eine beliebige Eingabe innerhalb seines Handlungsspektrums tätigt. Im EU-Projekt interactI-Ve [2] wurde bereits das menschliche Verhalten in Notfallsituationen untersucht. Anhand dieser Daten soll das Handlungsspektrum des Menschen konservativ abgeschätzt werden, um jede mögliche Handlung eines beliebigen Fahrers abbilden zu können.

Nur wenn für alle Handlungsmöglichkeiten in einem kurzen Zeitintervall in der Zukunft im Algorithmus die Sicherheit nachgewiesen werden kann, wird die Fahrzeugführung durch den Menschen zugelassen. Lässt sich jedoch zeigen, dass für eine mögliche Fahrereingabe eine Kollision des Fahrzeugs durch einen späteren Eingriff nicht mehr vermieden werden kann, dann überschreibt der Sicherheitsalgorithmus jegliche Vorgabe des Menschen und bringt das Fahrzeug entlang eines zuvor bestimmten Notfallmanövers in den Stillstand. Mit Hilfe der interactIVE-Versuchsdaten kann die Konservativität des aufgebauten Kollisionsvermeidungssystems anhand seiner Fehlauflöserate ermittelt werden. Dabei soll vor allem untersucht werden, welchen Einfluss die Länge des Fahrer-Prädiktionsintervalls hat.

Die Arbeit ist dabei folgendermaßen gegliedert:

Im folgenden Kapitel wird der Stand der Technik zu verschiedenen Teilbereichen sicherer Manöverplanung dargestellt, bevor daraus die Motivation für diese Arbeit abgeleitet wird. Das dritte Kapitel beschreibt die zur Verfügung stehenden Werkzeuge und Daten in Form von Softwarepaketen und Studienergebnissen. Im nächsten Kapitel wird erläutert, wie daraus die Parameter für ein Modell der menschlichen Fahrzeugsteuerung in Kollisionssituationen gewonnen werden können. Das fünfte Kapitel dieser Arbeit beschreibt, wie sich ein Berechnungsmodell zur sicheren Manöverplanung in Kollisionsvermeidung-Szenarien aus verschiedenen Teilschritten zusammensetzen lässt. Im sechsten Kapitel wird das er-

stellte Modell gegen Realdaten geprüft und hinsichtlich der Auswirkungen der Länge des Fahrer-Prädiktionsintervalls evaluiert. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick ab.

2 Stand der Technik und Motivation

In diesem Kapitel sollen die für diese Arbeit nötigen Grundlagen dargelegt werden. Dazu werden verschiedene Methoden zur Gewährleistung des sicheren Betriebs von Kraftfahrzeugen erläutert. Danach sollen bisherige Ansätze zur Modellierung des menschlichen Fahrverhaltens genannt werden, bevor auf bestehende Fahrzeugmodelle am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt eingegangen wird. Anschließend werden verschiedene Methoden zur Trajektorienplanung beschrieben. Das Kapitel schließt mit der Darlegung der Motivation für diese Arbeit ab.

2.1 Gewährleistung des sicheren Betriebs von Kraftfahrzeugen

Die Gewährleistung der funktionalen Sicherheit der Fahrzeuge ist ein wichtiger Bestandteil der Entwicklung bei den Automobilherstellern. Mit der ISO 26262 [38] wurde basierend auf der IEC 61508 [36] ein internationaler Standard geschaffen, der die Absicherung von Fahrzeugen bis zu einem Gewicht von 3.5 Tonnen regelt. Die funktionale Sicherheit kann dabei sowohl über Tests mit einem stochastischen Modell als auch mit Methoden der formalen Absicherung nachgewiesen werden.

2.1.1 Testbasierte Absicherung

In der ISO 26262 werden Bauteile und Funktionen mit dem Ergebnis einer Gefahren- und Risikoanalyse in verschiedene „Automotive Safety Integrity Level“ eingeteilt. Die insgesamt fünf Stufen regeln dabei abhängig von der Stärke der Gefährdung des Nutzers, der Eintrittswahrscheinlichkeit und der Beherrschbarkeit des Fehlers, wie groß die Ausfallwahrscheinlichkeit maximal sein darf. Zum Nachweis des Unterschreitens können verschiedene Prüfungen des Systems zum Einsatz kommen. So wurden für Fahrerassistenzsysteme „software-in-the-loop“ [70] und „hardware-in-the-loop“ [5] Methoden entwickelt, die Auslegung und Test einzelner Bauteile und Funktionen ermöglichen. Sie verhindern, dass zur Absicherung stets ein vollständiger Prototyp zur Verfügung stehen muss.

Insbesondere bei steigender Automatisierung von Fahrzeugen und dem damit verbundenen Einbau komplexerer Systeme stößt eine testbasierte Absicherung jedoch an ihre Grenzen. So wären laut [41], wie eingangs erwähnt, auf Basis eines wahrscheinlichkeitsbasierten Modells etwa 8.8 Milliarden Testmeilen nötig, um die automatisierten Fahrfunktionen abzusichern. Mit einer Testflotte von 100 Fahrzeugen würde dies etwa 400 Jahre dauern.

2.1.2 Formale Absicherung

Formale Absicherung ist eine Methode um zu beweisen, dass ein System bestimmte Anforderungen erfüllt. Dazu werden sowohl das System als auch die Anforderungen in ein mathematisches Modell überführt. In diesem kann ein mathematischer Beweis durchgeführt werden, der zeigt, dass das System die Anforderungen unter allen Umständen einhält. [64]

Die funktionale Sicherheit nach ISO 26262 kann auch mit Methoden der formalen Absicherung nachgewiesen werden [44].

Beim formalen Nachweis werden alle möglichen Szenarios gleichzeitig getestet. Dazu müssen Sensorunsicherheiten, Störungen, unsichere Ausgangszustände und sich verändernde Umgebungen im Nachweis berücksichtigt werden. Man unterscheidet dabei offline Absicherung, d.h. ein Nachweis vor dem Betrieb, und online Absicherung, d.h. Nachweis des sicheren Zustandes während des Betriebs. Besonders eine sich verändernde Umgebung kann nur bei einer online Verifikation berücksichtigt werden. [28]

Für die Trajektorienplanung stellt die Erreichbarkeitsanalyse eine Möglichkeit zur formalen Absicherung dar [21]. Dabei wird ausgehend von einem unsicheren Ausgangszustand zu jedem Zeitpunkt eine Menge möglicher Aufenthaltspunkte unter Einwirkung von veränderlichen, aber beschränkten Störungen bestimmt [14]. Damit kann dann beispielsweise gezeigt werden, dass es beim Umfahren eines Hindernisses durch ein Fahrzeug nicht zur Kollision kommt.

2.2 Modellierung des menschliche Fahrverhaltens

Fahrermodelle werden bereits seit mehreren Jahrzehnten aufgebaut und verbessert, um damit Methoden zu entwickeln, mit denen sich eine Verringerung der Toten und Verletzten im Straßenverkehr erreichen lässt [53] und mit denen Verkehrsflüsse optimiert werden können [27]. Die Modelle zielen darauf ab, den Fahrer bei der Fahrzeugführung so genau wie möglich zu imitieren, wobei sich die Fahrzeugführung aus den Teilen Längsführung (z.B. Geschwindigkeit) und Querführung (z.B. Lenkwinkel) zusammensetzt [68]. Sie können dafür eingesetzt werden den Fahrerwunsch und sein zukünftiges Verhalten vorherzusagen [1]. Damit ist es beispielsweise möglich, Fahrassistenzsysteme aufzubauen, die den realen Fahrer in Situation wie einem Spurwechsel unterstützen. Im Folgenden soll ein Überblick über regelungsorientierte Fahrermodelle gegeben werden, bevor darauf eingegangen wird, wie das gesamte Handlungsspektrum eines menschlichen Fahrers in worst-case Modellen abgebildet werden kann.

2.2.1 Regelungsorientierte Fahrermodelle

Nahezu alle der entwickelten Fahrermodelle zielen darauf ab, das menschliche Regelverhalten abzubilden. Ein Überblick über die verschiedenen Varianten wird beispielsweise in [1] und [68] gegeben. Die unterschiedlichen Tätigkeiten des Fahrers werden dabei nach dem hierarchischen Modell von Michon [53], basierend auf ihrem Zeitbezug, in drei Klassen eingeteilt:

- **Strategische Ebene:** Auf dieser Ebene werden grundlegende Entscheidungen der Fahrt getroffen, wie z.B. die Auswahl der Route aus mehreren Alternativen [51, 58].
- **Manöver Ebene:** Auf dieser Ebene entscheidet der Fahrer sich für die Art der Durchführung einer bestimmten Fahraufgabe, wie Fahren in einem Kreisverkehr [72], Durchfahren einer Kurve [13, 22], Abstandhalten zum Vorderfahrzeug [50], Halten der Spur [55] oder Vermeiden von Kollisionen [42].
- **Steuerungsebene:** Auf dieser Ebene werden alle Einzelaktionen des Fahrers zusammengefasst, bei denen er Steuerungseingaben an das Fahrzeug tätigt, wie Bremsen [61] oder Lenken [8].

Daneben wird in verschiedenen Studien untersucht, wie sich das Verhalten des Fahrers ändert, sobald er von seiner eigentlichen Fahraufgabe abgelenkt oder unaufmerksam ist [7, 71].

2.2.2 Worst-case Fahrermodelle

In worst-case Fahrermodellen kann das gesamte menschliche Handlungsspektrum abgebildet werden, d.h. es wird davon ausgegangen, dass sich alle Handlungsoptionen innerhalb eines definierten Intervalls eigrenzen lassen. Dies ist insbesondere für die Absicherung des sicheren Betriebs der Fahrzeuge wichtig, da Parameter im Modell dann die zu testenden Größen vorgeben. So wird beispielsweise im amerikanischen „fishhook-Test“ [18], bei dem die Kippstabilität ermittelt wird, anders als beim sogenannten „Elchtest“ [37], das Fahrzeug von einem Lenkroboter anstelle eines menschlichen Fahrers geführt. Die Rate, mit dem der Roboter den Lenkradwinkel im Fahrzeug maximal ändert ($720^\circ/\text{s}$, vgl. Abb. 1), wurde dabei in einer Studie ermittelt, bei der der Handlungsspielraum von menschlichen Fahrern im Bereich des Lenkverhaltens abgeschätzt wurde [17]. Damit ist ein worst-case Modell der menschlichen Querführung gegeben.

Im Bereich der Längsführung existieren bislang nur sehr wenige Modelle, die Grenzen der Einflussnahme auf die Stellung der Pedale durch den Fahrer beschreiben. So wird in

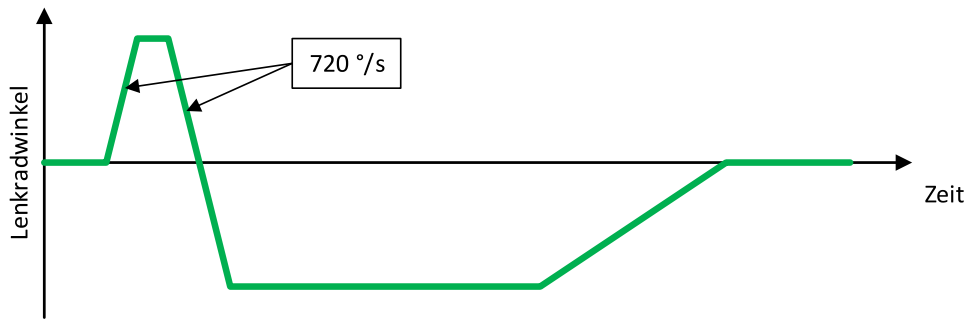


Abb. 1: Lenkradwinkelverlauf im „fishhook-Test“

[47] untersucht, wie sich die Fahrereinflussnahme auf Pedale und Lenkung in kritischen von normalen Situationen unterscheidet. Das Feld ist derzeit verstärkt Gegenstand der Forschung (z.B. im aktuell laufenden Projekt Pegasus [17]). Damit können in Zukunft beispielsweise Mindestanforderungen an automatisierte Fahrfunktionen zum Verhalten in kritischen Situationen aufgestellt werden, da die entwickelten Funktionen besser sein sollen als der menschliche Fahrer, den sie ersetzen.

2.3 Bestehende Fahrzeugmodelle am DLR

Im Folgenden sollen die bereits bestehenden Fahrzeugmodelle am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt vorgestellt werden, da diese in dieser Arbeit genutzt werden können. Mit den Fahrzeugmodellen kann das Verhalten des Versuchsträgers FAS-Car II, einem Passat Variant B6, unter Störung bestimmt werden.

Bei beiden genutzten Modellen handelt es sich um dynamische Einspurmodelle. Bei der Modellbildung wurden dabei gegenüber einem realen Fahrzeug einige Vereinfachungen getroffen. Diese umfassen unter anderem, dass die Vorder- und Hinterräder achsweise in der Achsmitte zu einem einzelnen Rad zusammengefasst werden, die gesamte Fahrzeugmasse im Schwerpunkt konzentriert wird und alle Hub-, Wank- und Nickbewegungen des Fahrzeugs vernachlässigt werden. Darüber hinaus gibt es keine dynamische Achslastverlagerung, d.h. die Radlastverteilung zwischen Hinter- und Vorderachse bleibt stets konstant. [57]

2.3.1 Dynamisches Einspurmodell

Im Modell wird aus Zustand des Fahrzeugs, Steuerungseingaben und anliegenden Störungen die zeitliche Änderung des Fahrzeugzustandes bestimmt. Der Zustandsvektor x besteht dabei aus der Position p_x , p_y , dem Gierwinkel Ψ , der Fahrzeuggeschwindigkeit

in Fahrzeugkoordinaten v_x, v_y und der Gierrate ω . Alle Angaben beziehen sich dabei auf den Berechnungspunkt im Modell, der im Fahrzeug in der Mitte der Hinterachse liegt (vgl. Abb. 2).

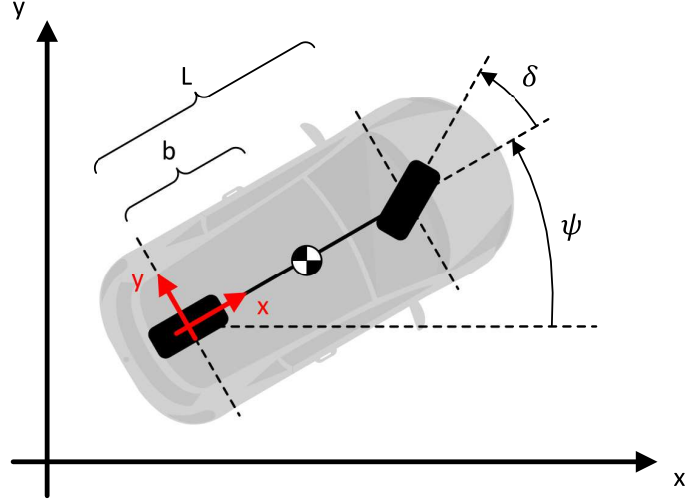


Abb. 2: Fahrzeugkoordinatensystem im dynamischen Einspurmodell

Die Steuerung des Fahrzeugs wird von der Beschleunigung in Fahrzeuginnenrichtung a_x und dem Lenkwinkel des Vorderrades δ gebildet. Die normalisierten Kräfte in Längsrichtung des Fahrzeugs e_{Fx} und in Querrichtung des Fahrzeugs an der Vorder- bzw. Hinterachse $e_{Fy,f/r}$ wirken als Störung während der Fahrzeugbewegung. [30]

$$x = [p_x, p_y, \Psi, v_x, v_y, \omega]^\top \quad \text{Zustand} \quad (1)$$

$$u = [a_x, \delta]^\top \quad \text{Steuerung} \quad (2)$$

$$w = [e_{Fx}, e_{Fy,f}, e_{Fy,r}]^\top \quad \text{Störung} \quad (3)$$

Damit lässt sich das Verhalten des Fahrzeugs mit folgendem differenziellen Zusammenhang beschreiben:

$$\dot{x} = f_B(x, u, w) = \begin{cases} \dot{x}_1 = x_4 \cdot \cos(x_3) - x_5 \cdot \sin(x_3) \\ \dot{x}_2 = x_4 \cdot \sin(x_3) + x_5 \cdot \cos(x_3) \\ \dot{x}_3 = x_6 \\ \dot{x}_4 = x_5 \cdot x_6 + u_1 + w_1 \\ \dot{x}_5 = F_{y,f}(x, u, w) + F_{y,r}(x, w) - x_4 \cdot x_6 \\ \dot{x}_6 = (L - b) \cdot \frac{m}{J} \cdot F_{y,f}(x, u, w) - b \cdot \frac{m}{J} \cdot F_{y,r}(x, w) \end{cases} \quad (4)$$

Dabei wurden die normalisierten Querkräfte am Vorderrad $F_{y,f}(x, u, w)$ und am Hinterrad $F_{y,r}(x, w)$ verwendet:

$$F_{y,f}(x, u, w) = -c_f \cdot \mu \cdot g \cdot \frac{b}{L} \cdot \left(\frac{x_5 + (L - b) \cdot x_6}{x_4} - u_2 \right) + w_2 \quad (5)$$

$$F_{y,r}(x, w) = -c_r \cdot \mu \cdot g \cdot \frac{L - b}{L} \cdot \left(\frac{x_5 - b \cdot x_6}{x_4} \right) + w_3 \quad (6)$$

Die hierbei neben Reibungskoeffizient μ und Ortsfaktor g genutzten Fahrzeugparameter sind in Tab. 1 aufgelistet.

Tab. 1: Fahrzeugparameter des dynamischen Einspurmodells

J/m (m ² /s ²)	L (m)	b/L	c_f	c_r
1.57	2.71	0.57	-9.7	-25.2

In einem Konformitätstest des Modells [25] wurde nachgewiesen, dass sich das reale Fahrzeug bei Verwendung der maximalen Messfehler und Unsicherheiten e stets im berechneten Bereich aufhält. Dabei beschreibt $\theta = \Psi + \arctan(v_y/v_x)$ die Richtung der Fahrzeugbewegung und $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ die absolute Fahrzeuggeschwindigkeit. Die einzelnen Werte sind in Tab. 2 aufgelistet.

Tab. 2: Maximale Messfehler und Unsicherheiten im Konformitätstest des dynamischen Einspurmodells

e_x (m)	e_y (m)	e_Ψ (°)	e_Θ (°)	e_v (m/s)	e_ω (°/s)	e_{f_x}	$e_{f_{y,f}}$	$e_{f_{y,r}}$
0.04	0.04	1	1	0.05	2	0.1g	0.057g	0.043g

2.3.2 Dynamisches Einspurmodell mit linearem Regler

Das dynamische Einspurmodell mit linearem Regler basiert auf dem im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Modell und wurde so erweitert, dass das Fahrzeug geregelt einer Referenztrajektorie folgen kann. Die Referenztrajektorie ist dabei durch Zustand x_{ref} und Steuerung u_{ref} eines Referenzfahrzeugs bestimmt. Im Regler werden Verstärkungen proportional zur Stärke der Abweichung des Zustandes berechnet und damit die Fahrzeugsteuerung so bestimmt, dass das Fahrzeug seine Trajektorie der Referenztrajektorie angleicht. Die Änderungen des Fahrzeugzustandes verhalten sich entsprechend dem differentiellen Zusammenhang in Gl. 4, wobei ebenfalls Störungen w berücksichtigt werden. Gl. 7 gibt das dynamische Einspurmodell mit linearem Regler als mathematische

Funktion wieder. Die genauen Zusammenhänge in Form von mathematischen Abhängigkeiten zwischen Ausgangs- und Eingangsgrößen sind in [11] dargestellt.

$$[\dot{x}, \dot{x}_{ref}, u] = f_{BC}(x, x_{ref}, u_{ref}, w) \quad (7)$$

2.4 Trajektorienplanung

Trajektorienplanung beschäftigt sich mit der Berechnung einer möglichen Sollbahn, ausgehend von einem wahrnehmungs- und/oder kartengestütztem Lagebild [73]. Es existieren dafür verschiedene Lösungsansätze [23]. Im Folgenden sollen die Möglichkeiten vorgestellt werden, die Trajektorienplanung als Optimierung und als Suche in einem Graphen im Sinne einer formalen Absicherung durchführen zu können.

2.4.1 Formulierung und Lösung als Optimierungsproblem

Trajektorienplanung kann als Optimierungsproblem aufgefasst werden. Dazu muss zunächst ein Modell des zu steuernden Fahrzeugs und die Einflussmöglichkeiten auf die Bewegung durch Steuerungseingaben ermittelt werden.

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (8)$$

Dabei beschreibt der Vektor $x \in \mathbb{R}^n$ den Fahrzeugzustand während der Bewegung und der Vektor $u \in \mathbb{R}^m$ die möglichen Steuerungseingaben. Über die Funktion $f : [\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m] \rightarrow \mathbb{R}^n$ kann die daraus resultierende zeitliche Änderung des Fahrzeugzustandes bestimmt werden.

Anschließend muss eine Zielfunktion J formuliert werden, die beliebige Trajektorien des Fahrzeuges durch einen Skalar, den sogenannten Kosten, bewertet. Als Konvention gilt, dass die optimale Trajektorie bei den geringsten Kosten erreicht wird [9].

Da bei der Trajektorienplanung Gl. 8 eingehalten werden muss, findet die Optimierung stets unter Nebenbedingungen statt. Darüber hinaus können noch weitere Bedingungen aufgestellt werden, die den Lösungsraum einschränken, wobei diese in Form von Ungleichungen oder Gleichungen formuliert sein müssen. So kann beispielsweise die maximale Fahrzeuggeschwindigkeit begrenzt sein oder die Position des Fahrzeugs auf seine aktuelle Spur eingeschränkt werden.

Zur numerischen Lösung des Optimierungsproblems wird nach der Zeit diskretisiert, wobei bei Auswertungen mit sogenanntem endlichem Horizont die Betrachtung auf $K \in \mathbb{N}$

Zeitschritte beschränkt bleibt. Eine Trajektorie X_i aus der Menge aller möglichen Trajektorien X lässt sich damit als Folge von Fahrzeugzuständen ansehen, beginnend mit dem Anfangszustand x_0 .

$$X_i = [x_0, x_1, x_2, \dots, x_K] \in X \quad (9)$$

Da sich nichtlineare Systeme oft nur schwer effizient berechnen lassen, wird Gl. 8, sofern möglich, jeweils pro Zeitschritt um den aktuellen Zustand linearisiert. Stellt man anschließend die Gleichung noch um, so ergibt sich die folgende Beziehung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zuständen.

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k \quad (10)$$

Dabei ist $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ und $k \in \{0, 1, \dots, K-1\}$.

Zusammengefasst lässt sich das diskretisierte Optimierungsproblem schreiben als:

$$\begin{aligned} & \min_{X_i} J(X_i) \\ & \text{mit } g_p(X_i) \leq 0, \text{ für } p = 1, \dots, P \in \mathbb{N} \\ & \quad h_q(X_i) = 0, \text{ für } q = 1, \dots, Q \in \mathbb{N} \\ & \quad X_i \in X \end{aligned} \quad (11)$$

Gesucht wird die unter Beachtung von J beste Trajektorie X_i aus der Menge aller möglichen Trajektorien X , die allen P als Ungleichung formulierten Nebenbedingungen $g_{1,\dots,P}$ und allen Q als Gleichung formulierten Nebenbedingungen $h_{1,\dots,Q}$ genügt. Gl. 10 ist beispielsweise durch Umstellen der Gleichung in den Nebenbedingungen h enthalten.

Hat man die optimale Trajektorie X^* gefunden, so kann über Gl. 10 auch die Folge von Steuereingaben U^* errechnet werden, mit denen diese Trajektorie abgefahren werden kann. Wird dieses Optimierungsproblem nur einmalig zu Beginn gelöst, so spricht man von Optimalsteuerung. Wird dagegen in jedem Zeitschritt das Optimierungsproblem neu gelöst so handelt es sich um Model Predictive Control, kurz MPC. Im zweiten Fall ist es eine Regelung, da es eine (indirekte) Rückkopplung gibt, die das System auch unter unerwarteten Abweichungen (Störungen, Modellfehler, etc.) stabilisiert.

Das Unterverfahren des tube-based MPC ermöglicht es, besonders effizient Trajektorien für abweichungsbehaftete, d.h. für nichtdeterministische, Systeme zu finden. Dabei wird, wieder ausgehend vom aktuellen Fahrzeugzustand, eine vollständige Trajektorie geplant und diese dann anschließend um Abweichungen durch Fehler „aufgedickt“. Dies ist nötig, da auf Grund des Nichtdeterminismus der Übergang von einem Zustand in den nächsten nicht mehr bestimmt ist, sondern bei bekannter Abweichung (z.B. in Form

von Unsicherheiten) nur noch eine Menge angegeben werden kann, in die sich dieser Zustand entwickeln kann. Insgesamt entsteht so ein Trajektorienbündel, das die Form eines Schlauchs (engl. tube) hat. Alle zum Zeitpunkt t_k erreichbaren Zustände x_k werden in einer sogenannten Erreichbarkeitsmenge \mathcal{X}_k zusammengefasst, wobei das Trajektorienbündel, d.h. der Verlauf der Erreichbarkeitsmengen \mathcal{X} des Fahrzeugs während der Berechnung, der Vereinigung der Erreichbarkeitsmengen aller Zeitpunkte entspricht.

$$\mathcal{X} = \bigcup_k \mathcal{X}_k \quad (12)$$

Derartige Algorithmen lassen sich besonders effizient auf Zonotope anwenden [4]. Diese sind eine Beschreibungsform von vieldimensionalen, konvexen sowie punktsymmetrischen Polyedern. Ausgehend von seinem Zentrum c_0 kann jeder Punkt innerhalb des Zonotops durch eine Linearkombination seiner Generatoren g_i beschrieben werden. Das Zonotop Z ist definiert durch die in Gl. 13 gezeigte Darstellung. c_0 ist dabei ein Spaltenvektor von der gleichen Dimension wie das Zonotop, bei g_i handelt es sich um eine Matrix mit Zeilen entsprechend der Anzahl des Zonotops. Die Anzahl der Generatoren, d.h. die Anzahl der Spalten in der Matrix ist nicht begrenzt. Sie definiert, gewichtet mit der Anzahl der Dimensionen des Zonotops, die Ordnung des Zonotops.

$$Z = \langle c_0, g_i \rangle \quad (13)$$

Auf Grund des Nichtdeterminismus ist es oft nur schwer möglich, schon bei der Optimierung der Trajektorie festzustellen, ob auch \mathcal{X} alle Randbedingungen einhalten wird. Man trifft deshalb Annahmen, wie beispielsweise einen geforderten Mindestabstand zu einem Hindernis, von denen erwartet wird, dass sie zu einer gültigen Lösung führen. Verletzt eine Erreichbarkeitsmenge \mathcal{X}_k dennoch die Randbedingungen, so wird die Annahme entsprechend angepasst (hier die Vergrößerung des Mindestabstandes zum Hindernis) und die Rechnung erneut durchgeführt. Diese Schritte können so lange wiederholt werden, bis X entweder leer ist und somit keine Lösung existiert oder eine Trajektorie gefunden wurde, die auch fehlerbehaftet die Randbedingungen einhält.

Tube-based MPC zeichnet sich besonders durch die anschauliche Benennung eines beschränkten, störungsbehafteten Optimierungsproblems aus. Nachteilig sind jedoch die hohen Anforderungen an das Berechnungssystem, da die Lösung sonst viel Rechenzeit in Anspruch nimmt. [48]

Wie in [20, 24] gezeigt, lassen sich jedoch bereits mit heutiger Hardware in Form von tube-based MPC formulierte Probleme in Echtzeit lösen.

2.4.2 Formulierung und Lösung als Graphensuche

Die grundsätzliche Idee der Pfadplanung ist es einen Weg von einem Ausgangspunkt zu einem Zielpunkt zu finden. Diskretisiert man die Umgebung des Fahrzeugs und drückt diese als Belegungskarte oder als Gitter aus, so vereinfacht sich das Finden eines möglichen, kollisionsfreien Pfades, da es nur noch endlich viele Möglichkeiten gibt. Das Problem der Pfadplanung kann unter Nutzung des Gitters als Suche nach dem besten Weg in einem Graphen aufgefasst werden. Eine derartige Suche hat auch über die Trajektorienplanung von Fahrzeugen hinaus große Bedeutung, so dass sich ein Teilzweig der Mathematik, die sogenannte Graphentheorie, mit dem Lösen solcher Probleme befasst [65]. Die wichtigsten Lösungsalgorithmen sollen an dieser Stelle kurz beschrieben werden [23]:

- **Dijkstra Algorithmus:** Ausgehend von einem Startpunkt wird immer derjenigen Verbindung zum nächsten Gitterpunkt gefolgt, die insgesamt den kürzesten Abstand zum Startpunkt besitzt. Damit ist zu jedem besuchten Gitterpunkt die kürzeste Verbindung zum Startpunkt bekannt. Die Suche wird so lange fortgesetzt, bis entweder eine Verbindung zum Zielpunkt gefunden wurde (die nach diesem Vorgehen dann die kürzeste ist) oder alle Gitterpunkte besucht wurden und somit ausgeschlossen werden kann, dass es Lösung gibt. Eine Implementierung für die Trajektorienplanung von Fahrzeugen wurde z.B. in [35] beschrieben.
- **A-Stern Algorithmus (A*):** Dieser Algorithmus ist eine Erweiterung des Dijkstra Algorithmus um eine Heuristik, die die verbleibende Entfernung zum Ziel abschätzt. Dies ermöglicht eine zielgerichtete Suche, da nicht kreisförmig um den Startpunkt, sondern direkt in Richtung des Zielpunktes gesucht wird. Der Algorithmus ist Basis für zahlreiche Anpassungen und Verbesserungen, wie z.B. D*, der bei einer Veränderung des Gitters seine bisherigen Ergebnisse nicht verwerfen und von vorne beginnen muss [60]. Eine Variante des Algorithmus wurde beispielsweise im Fahrzeug, das die DARPA Urban Challenge gewonnen hat, eingesetzt [40].
- **Zustandsgitter Algorithmus:** Dieser Algorithmus nutzt die diskretisierte Fahrzeugumgebung zusammen mit einem Gitter von Fahrzeugzuständen. Die Übergänge zwischen den Gitterpunkten sind durch verschiedene Möglichkeiten festgelegt. Über eine Kostenfunktion kann der Algorithmus den besten Pfad finden. Der Algorithmus wurde beispielsweise in [34] in verschiedenen Varianten eingesetzt.

In Abb. 3 ist beispielhaft ein solcher Graph dargestellt. Es wurden dabei acht unterschiedliche Orientierungen von Manövern eingezeichnet. Einige Konfigurationen wurden zur besseren Sichtbarkeit in schwarz hervorgehoben. Zusätzlich ist eine mögliche Trajektorie in rot eingezeichnet.

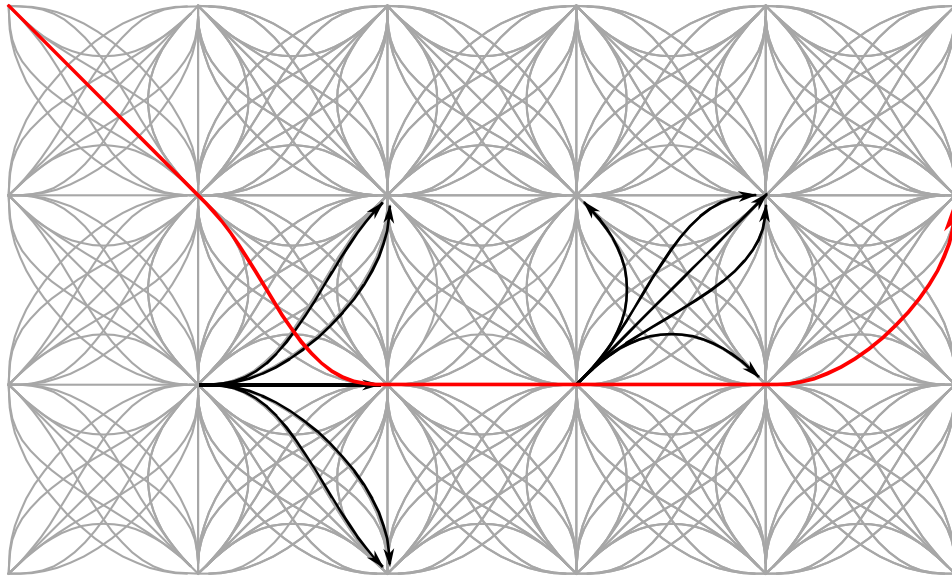


Abb. 3: Graph zur Trajektorienplanung mit möglichen Übergängen (schwarz) und Trajektorie (rot) [73]

2.5 Motivation

Um die Anzahl der Toten und Verletzten im Straßenverkehr zu reduzieren, werden von den Automobilherstellern und ihren Zulieferern immer leistungsfähigere Assistenzsysteme entwickelt, die den Fahrer im Betrieb unterstützen sollen. Es ist absehbar, dass diese Systeme bald so leistungsfähig sind, dass sie auch selbstständig die Fahrzeugführung übernehmen können [10]. Viele Menschen haben jedoch den Wunsch, die Kontrolle der Fahrzeugsteuerung nicht komplett an das Fahrzeug abzugeben, sondern möchten auch in Zukunft gerne noch selbst Auto fahren. Es ist deshalb wichtig, auch den Menschen in den Sicherheitsnachweis mit einzubeziehen, da er für absehbare Zeit als Fahrzeugführer Teil des Straßenverkehrs bleiben wird. Zur Absicherung von Fahrzeugen gibt es verschiedene Möglichkeiten. Formale Absicherung bietet, im Gegensatz zur testbasierter Absicherung, die Möglichkeit die Betriebssicherheit von Fahrzeugen anhand eines mathematischen Modells zu beweisen. Die Einbeziehung des Fahrers in eine formale online Absicherung ist jedoch aktuell noch Gegenstand der Forschung.

In dieser Arbeit soll deshalb basierend auf Daten von Studien aus dem Projekt interactive ein worst-case Fahrermodell entwickelt werden, um damit ein formal abgesichertes

Kollisionsvermeidungssystem aufzubauen, das die Fahrer-Fahrzeug Interaktion berücksichtigt. Das System soll dabei ausgehend von einer Analyse aller möglichen Fahrereingaben für ein kurzes Zeitintervall in der Zukunft eine kollisionsfreie Notfalltrajektorie in den Stillstand planen, wobei über eine Erreichbarkeitsanalyse geprüft wird, dass es in keinem Fall zu einem Unfall kommt. Gibt es einen solchen Pfad nicht, so wird eine Interaktion des Fahrers mit dem Fahrzeug nicht zugelassen und das Fahrzeug wird stattdessen mit dem letzten gültigen Notfallmanöver zum Stillstand gebracht. Dabei kann auf bereits bestehende Fahrzeugmodelle am DLR zurückgegriffen werden.

Der aufgebaute Algorithmus wird anschließend anhand der interactIVe Daten über seine Fehlauflöserate auf Konservativität überprüft, wobei besonders untersucht werden soll, wie sich verschiedene Prädiktionszeiten für das Fahrerverhalten auswirken. Da diese Überprüfung nur am Rechner stattfindet, müssen keine neuen Realversuche durchgeführt werden. Auch Echtzeitfähigkeit ist keine Anforderung an den Algorithmus, es geht vor allem um den Nachweis, dass ein Einbinden des Fahrers in eine formale Absicherung möglich ist (proof of concept).

3 Verwendete Software und Daten

In diesem Abschnitt wird dargelegt, welche Hilfsmittel in Form von Software bzw. Daten für die Bearbeitung dieser Arbeit zur Verfügung stehen. Zunächst werden die verschiedenen Softwarepakete vorgestellt, die zur Lösung der Probleme genutzt werden sollen. Anschließend wird auf eine am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt durchgeführte Realstudie aus dem EU-Projekt interactIVe eingegangen, deren Daten in dieser Arbeit genutzt werden können.

3.1 Softwarepakete

Im Folgenden werden die Softwarepakete ACADO und CORA vorgestellt, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit zur Optimierung und Erreichbarkeitsanalyse eingesetzt werden. Beide sind Erweiterungen für das Programm Matlab, das in der Version R2016b verwendet werden soll.

3.1.1 Optimierung

Das ACADO Toolkit (Automatic Control and Dynamic Optimization) ist eine Sammlung von Algorithmen für Regelung und dynamische Optimierung. Es stellt unter anderem eine Umgebung zur Nutzung einer Vielzahl von Berechnungsmöglichkeiten für Optimalsteuerung, Model Predictive Control (MPC), Zustands- und Parameterschätzung sowie robuste Optimierung bereit. Das ACADO Toolkit ist in der Sprache C++ implementiert, kann jedoch auch über eine integrierte Matlab Schnittstelle angesprochen werden. Auf Grund der objektorientierten Programmierung des Toolkits können bestehende Berechnungsroutinen auch ohne genaue Kenntnis des Berechnungsablaufs in einfacher Weise um benutzerdefinierten Code erweitert werden. [33]

Das ACADO Toolkit ist unter der GNU Lesser General Public License Version 3 frei verfügbar und kann damit von jedem (auch für proprietäre Software) ohne den Zwang verwendet werden, den selbst hinzugefügten Teil offenlegen zu müssen. [19]

In dieser Arbeit wird die derzeit aktuellste Version v2022 von ACADO verwendet. Die Matlab Schnittstelle des Toolkits nutzt Microsoft Visual C++ 2013 Professional zur Kompilierung des C++ Codes.

3.1.2 Erreichbarkeitsanalyse

Bei CORA (Continuous Reachability Analyzer) handelt es sich um eine Toolbox für das Programm Matlab, die dazu dient, cyber-physische Systeme durch Erreichbarkeitsanalysen formal abzusichern. Es enthält dafür verschiedene Mengendarstellungen in Vektor- und Matrixform sowie verschiedene Algorithmen zur Berechnung der Erreichbarkeit unterschiedlicher dynamischer Systeme. Wegen der objektorientierten Programmierung der Toolbox können diese auch ohne genaue Kenntnis des Berechnungsablaufs in einfacher Weise benutzerdefiniert angepasst und erweitert werden. [3]

CORA ist ebenfalls unter der GNU Lesser General Public License Version 3 frei verfügbar und kann damit wie das ACADO Toolkit von jedem (auch für proprietäre Software) ohne den Zwang verwendet werden, den selbst hinzugefügten Teil offenlegen zu müssen. [19]

In dieser Arbeit wird die derzeit aktuellste Version CORA 2016 verwendet.

3.2 Realstudie im Projekt interactIVe

Das EU-Projekt interactIVe (Accident avoidance by active intervention for intelligent vehicles) hatte das Ziel neue Fahrassistenzsysteme mit hoher Leistungsfähigkeit zu entwickeln, die die Intelligenz von Fahrzeugen erhöhen sowie Sicherheit und Effizienz des Fahrens verbessern [2]. Das DLR beteiligte sich als einer von mehreren Projektpartnern und führte in den Jahren 2012 und 2013 drei Studien zu Lenkassistenten durch. Die Studien fanden dabei sowohl im Simulator als auch in Realität statt. Im Folgenden soll die Realstudie vorgestellt werden, wobei zunächst auf das eingesetzte Versuchsfahrzeug eingegangen wird, bevor die Durchführung und die dabei aufgezeichneten Daten beschrieben werden.

3.2.1 Versuchsfahrzeug FAS-Car II

Das Versuchsfahrzeug FAS-Car II basiert auf einem VW Passat Variant B6 und wurde mit einem steer-by-wire System ausgestattet, das das Auskoppeln des Lenkrades von der Lenkung ermöglicht. Es ist außerdem mit einer Vielzahl von Sensoren ausgerüstet, die beispielsweise selbständiges Notfallsausweichen ermöglichen. [26, 56]

Die äußeren Abmessungen des Versuchsfahrzeugs FAS-Car II sind in Abb. 5 dargestellt.



Abb. 4: Versuchsfahrzeug FAS-Car II [26]

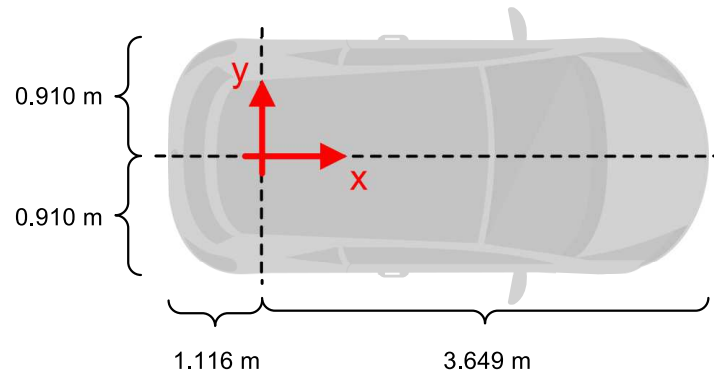


Abb. 5: Äußere Abmessungen des Versuchsfahrzeugs FAS-Car II [15]

3.2.2 Durchführung und zur Verfügung stehende Daten

Die durchgeführten Studien zielten darauf ab, verschiedene Möglichkeiten der Ausgestaltung einer Lenkassistenten in Notfallsituationen zu testen. Dabei wurde insbesondere der Frage nachgegangen, wie das Assistenzsystem gestaltet werden kann, um in Gefahrensituationen Kollisionen möglichst gut verhindern zu können und dabei trotzdem die Kontrollierbarkeit bei Fehlauflösung sicherzustellen [26].

Der Realversuch wurde mit dem Testfahrzeug FAS-Car II auf dem Gelände der Kaserne „Heinrich der Löwe“ in Braunschweig durchgeführt. Die Teststrecke und der Versuchsaufbau sind in Anhang A dargestellt. Es wurden Versuchsergebnisse von 45 Teilnehmern aufgezeichnet, die sich zu gleichen Teilen auf die drei Gruppen aufteilen: *Assistiert mit stets eingekoppeltem Fahrer*, *Assistenz mit ausgekoppeltem Fahrer* und *Kontrollgruppe*. *Assistiert mit stets eingekoppeltem Fahrer* bedeutete dabei, dass der Fahrer sofort bei Eingriff der Lenkassistenten in der Lage war, dem Manöver zu folgen oder es zu übersteuern. Im Fall von *Assistenz mit ausgekoppeltem Fahrer* konnte der Fahrer bei Eingriff der

Assistenz erst nach einer Zeit von 0.5 Sekunden durch Gegenlenken wieder in die Lenkung eingreifen, wobei er auch ohne eigenen Eingriff stets nach insgesamt 0.8 Sekunden die Kontrolle über die Lenkung zurückerhielt. In der *Kontrollgruppe* wurde der Fahrer nicht durch Lenkassistenten unterstützt.

Im Experiment fuhren die Probanden eine Strecke mit verschiedenen Fahraufgaben (z.B. Slalom) ab, wobei ihnen anstelle des Versuchsziels im Vorfeld mitgeteilt wurde, dass ein drive-by-wire System getestet werden soll. Der eigentliche Versuch beinhaltete wieder eine drohende Kollisionssituation und eine Fehlauflösung (nicht für die *Kontrollgruppe*). Im Realversuch wurde das Kollisionshindernis in der zweiten Hälfte einer geraden Strecke durch ein Netz abgebildet, das bei Durchfahren einer Lichtschranke auf die Strecke gezogen wurde und etwa die Hälfte der Fahrspur blockierte (vgl. Abb. 6). Für vergleichbare Testbedingungen wurde das Fahrzeug von einem Tempomaten bis zum Fahrereingriff auf einer Geschwindigkeit von 50 km/h gehalten. Der Abstand bei Auftreten des Hindernisses entsprach einer Time to Collision von 1.6 Sekunden. Die Fehlauflösung fand im späteren Versuchsverlauf bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h statt. In der Auswertung wurde anhand der lateralen Versetzung auf Grund des Eingriffs des Assistenzsystems beurteilt, ob die Fehlauflösung im realen Straßenverkehr beherrschbar gewesen wäre. Die Ergebnisse der Studie sind in Tabelle 3 dargestellt. [31]



Abb. 6: Hindernis in der zweiten Studie des Projekts interactIVe [31]

Tab. 3: Ergebnisse der zweiten Studie für das Projekt interactIVe

Variante	Kollision		Kontrolle Fehlauflösung	
	ja	nein	ja	nein
Assistiert mit stets eingekoppeltem Fahrer	15	0	15	0
Assistenz mit ausgekoppeltem Fahrer	1	14	0	15
Kontrollgruppe	15	0	-	-

Die Ergebnisse der Studie liegen für diese Arbeit vor und können in ihr verwendet werden. Besonders die *Kontrollgruppe* bildet das Verhalten von Menschen in Kollisionsvermeidungs-Szenarien in unverfälschter Form ab. Die während der Experimente aufgenommenen Daten sind als Excel Tabellen im Format .csv abgelegt, wobei zum Fahrzeugzustand

jeweils u.a. Position, Gierwinkel, Geschwindigkeit, Gierrate und Beschleunigung über die Zeit aufgezeichnet wurden. Im Bereich der Fahrerinteraktion sind Gaspedalstellung, Bremsdruck und Lenkradwinkel zum jeweiligen Zeitpunkt bekannt. Dagegen wurden Daten z.B. zum Lenkwinkel, zur Bremspedalstellung, zum eingelegten Gang oder zur Motordrehzahl nicht erhoben.

4 Parameter eines Modells der menschlichen Fahrzeugsteuerung

In diesem Kapitel soll ein worst-case Modell eines menschlichen Fahrers aufgestellt werden, das die maximale Einflussnahme des Fahrers auf die Fahrzeugführung abschätzt und im Bezug auf die Veränderung der Fahrzeugbewegung in einem kurzen, zukünftigen Intervall vorhersagt. Da für diesen Bereich, wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, aktuell keine geeigneten Modelle und Methoden zur Modellierung existieren, leitet diese Arbeit anhand der interactIVe Daten ein worst-case Fahrermodell ab.

Das Problem der Erstellung des Fahrermodells wird auf Grund seiner Komplexität zunächst in Teilprobleme der menschlichen Leistungsparameter und ihrer Vermittlung zu einer Änderung der Fahrzeugbewegung aufgeteilt. Anschließend werden die erhaltenen Ergebnisse bewertet und im Falle einer nicht zufrieden stellenden Lösung durch eine andere Approximation ersetzt.

4.1 Ableitung der menschlichen Leistungsparameter aus Versuchsdaten

Zur Abschätzung des Intervalls, in dem ein menschlicher Fahrer seine Fahreingabe verändern kann, sollen im Folgenden die Daten des Realversuchs des interactIVe-Projekts hinsichtlich der menschlichen Leistungsparameter ausgewertet werden. Die Betrachtung ist dabei in die Bereiche Längs- bzw. Querverführung des Fahrzeugs aufgeteilt.

4.1.1 Längsführung

Ein menschlicher Fahrer kann ein Fahrzeug über seinen Einfluss auf die Stellung der Pedale in Längsrichtung steuern. Es soll deshalb im Folgenden untersucht werden, mit welcher Geschwindigkeit ein Mensch die Pedalstellung ändern kann und wie lange ein Wechsel zwischen den Pedalen mindestens dauert. Da im Versuch für den Bremsengriff anstelle der Pedalstellung der Druck innerhalb des Bremssystems aufgezeichnet wurde, soll dieser zur Auswertung herangezogen werden. Für das Gaspedal erfolgt die Auswertung über die Pedalstellung. Ein Kupplungspedal wird nicht berücksichtigt, da das Versuchsfahrzeug ein Automatikgetriebe besitzt.

Der Verlauf einer beliebig herausgegriffenen Messung über die Zeit ist in Abb. 7 dargestellt, wobei dabei zur besseren Lesbarkeit der Eingriff am Gaspedal in positive Richtung und der Eingriff am Bremssystem in negative Richtung aufgetragen wurde.

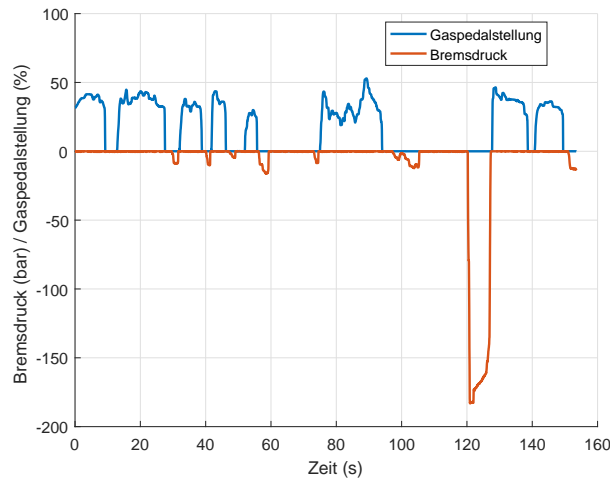


Abb. 7: Zeitlicher Verlauf des Eingriffs am Gaspedal und im Bremssystem

Filtert man diesen Verlauf zur Unterdrückung von Messrauschen mit einem gleitenden Mittelwert mit einer Fensterbreite von sieben Messwerten, leitet ihn anschließend numerisch mit einem zentralen Differenzenquotienten für drei Stützstellen mit ungleichmäßigem Abstand [59] nach der Zeit ab und trägt ihn über den zugehörigen Wert zum jeweiligen Zeitpunkt auf, so ergeben sich für die Eingriffe am Gaspedal und am Bremssystem die in Abb. 8 dargestellten Zusammenhänge. In Anlehnung an die Darstellung von Schwingungen [46] sollen diese im Folgenden als Phasenportraits bezeichnet werden. Das Änderungsvermögen der normierten Gaspedalstellung durch den Fahrer kann durch die Verwendung einer unteren und oberen Schranke basierend auf dem minimalen bzw. maximalen Wert auf den Bereich von etwa $-265 \text{ \%}/\text{s}$ bis $300 \text{ \%}/\text{s}$ abgeschätzt werden. Für den Bremseneingriff ergibt sich bezogen auf den Bremsdruck ein Bereich von etwa $-365 \text{ bar}/\text{s}$ bis $425 \text{ bar}/\text{s}$.

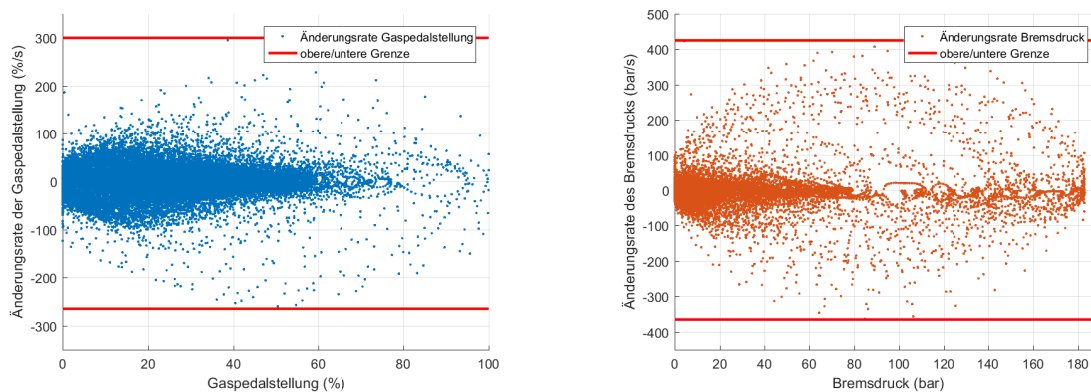


Abb. 8: Phasenportraits Eingriff am Gaspedal (links) und am Bremssystem (rechts)

Zur Ermittlung der Mindestzeit für einen Pedalwechsel wird auf die Darstellung der Verläufe von Gas- und Bremseneingriff in Abb. 7 zurückgegriffen. Der in Abb. 9 gezeigt

te, detailliertere Ausschnitt zeigt die beiden Fälle, die untersucht werden müssen. Zur Unterdrückung des Messrauschens soll bei der Ermittlung der Wechselzeit das Gaspedal als gedrückt gelten, sobald es die normierte Stellung von 0.2 % überschreitet, beim Bremsengriff soll ein Mindestdruck von 0.75 bar herangezogen werden.

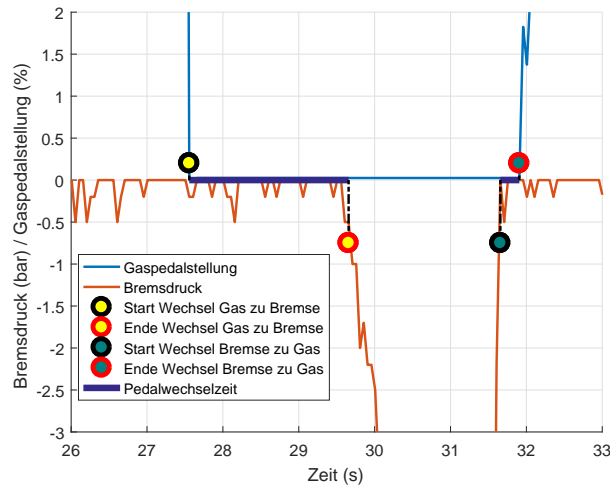


Abb. 9: Pedalwechselzeit im Zeitverlauf

Es können die beiden Fälle Wechsel von Gas zu Bremse und von Bremse zu Gas unterschieden werden. Trägt man ohne Unterscheidung der beiden Fälle für alle Testdaten die Häufigkeit des Auftretens eines Wechsels innerhalb eines Zeitfensters gegenüber diesem Zeitfenster an, so erhält man das links in Abb. 10 dargestellte Histogramm. Auf Grund der Aufzeichnungsfrequenz der Daten von etwa 20 Hz wurden Zeitfenster der Breite 50 ms gewählt.

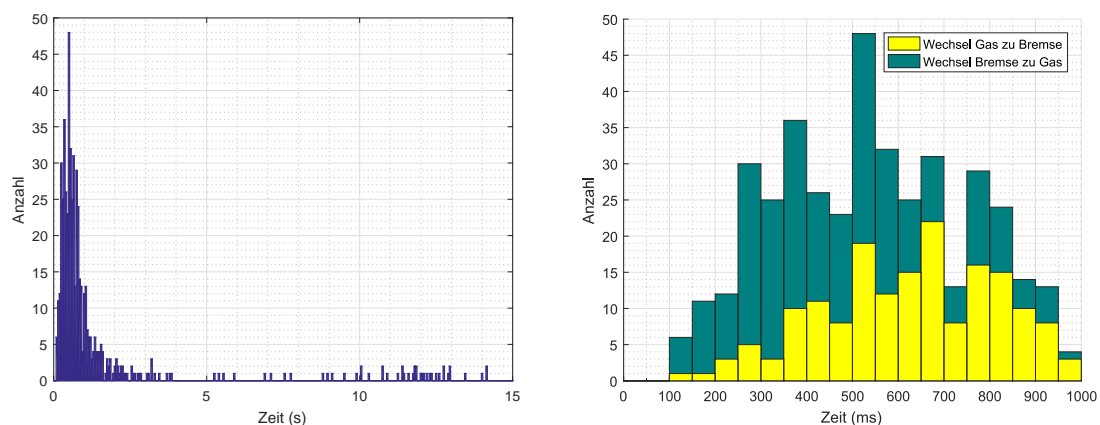


Abb. 10: Histogramme der Pedalwechselzeiten (links gesamt, rechts für Zeiten kleiner 1 Sekunde)

Da zur konservativen Abschätzung der Fahrerfähigkeiten die minimale Wechselzeit interessant ist, stellt die rechte Seite von Abb. 10 den Bereich der Zeitfenster kleiner 1 s

für beide Wechselarten genauer dar. Hieraus wird ersichtlich, dass die Wechselzeit im Versuch zu jeder Zeit größer als 100 ms war. Darüber hinaus zeigt sich, dass im Bereich von kurzen Pedalwechselzeiten die Anzahl der Wechsel von Bremse zu Gas überwiegt. Dies ist dadurch begründet, dass sich die Untersuchung auf den Anstieg des Bremsdrucks stützt, der jedoch im Fahrzeug dem Drücken des Bremspedals mit zeitlicher Verzögerung nacheilt [56]. In der Klasse der geringsten Pedalwechselzeiten (100 ms bis 150 ms) sind sowohl Wechsel von Bremse zu Gas als auch von Gas zu Bremse vertreten. Damit kann die minimale Wechselzeit von 100 ms für beide Arten eines Pedalwechsels verwendet werden und diese müssen nicht unterschieden werden.

4.1.2 Querführung

Der Fahrer kann über die Veränderung der Lenkradstellung das Fahrzeug in Querrichtung steuern. In diesem Abschnitt soll deshalb untersucht werden, wie stark ein Mensch die Stellung des Lenkrades pro Zeiteinheit verändern kann, um so sein Einflussvermögen in diesem Bereich abschätzen zu können. In Abb. 11 ist der Zeitverlauf der Lenkradstellung einer beliebig herausgegriffenen Fahrt dargestellt.

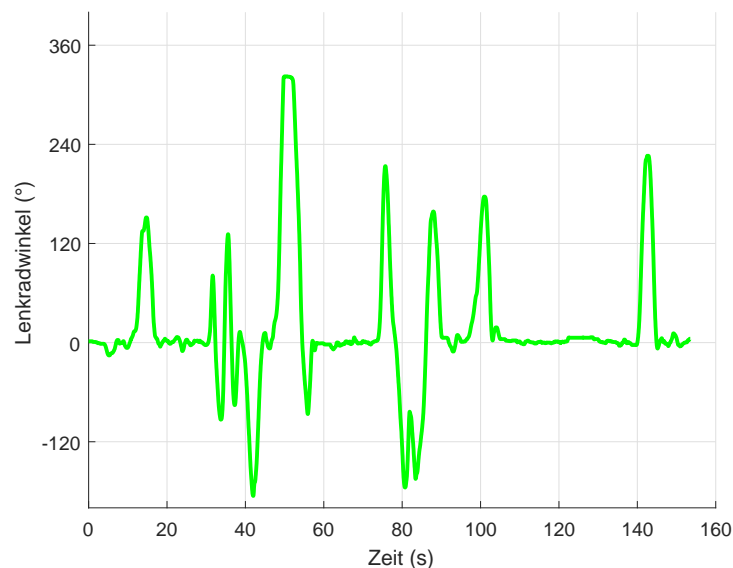


Abb. 11: Lenkradwinkel über die Zeit für eine Realfahrt im Versuch

Um keine falschen Werte durch den Eingriff des Assistenzsystems zu berücksichtigen, werden in der Auswertung nur die Daten der *Kontrollgruppe* verwendet. Filtert man den Lenkradwinkel aus den entsprechenden Messreihen zur Unterdrückung von Messrauschen wieder mit einem gleitenden Mittelwert mit einer Fensterbreite von sieben Messwerten und leitet ihn mit Hilfe des zuvor genutzten Differenzenquotienten nach der Zeit ab, so ergibt sich das in Abb. 12 dargestellte Phasenportrait. Es lassen sich mit $-475^\circ/\text{s}$ und

380 °/s eine untere bzw. obere Schranke für eine Lenkradwinkeländerung durch einen menschlichen Fahrer finden.

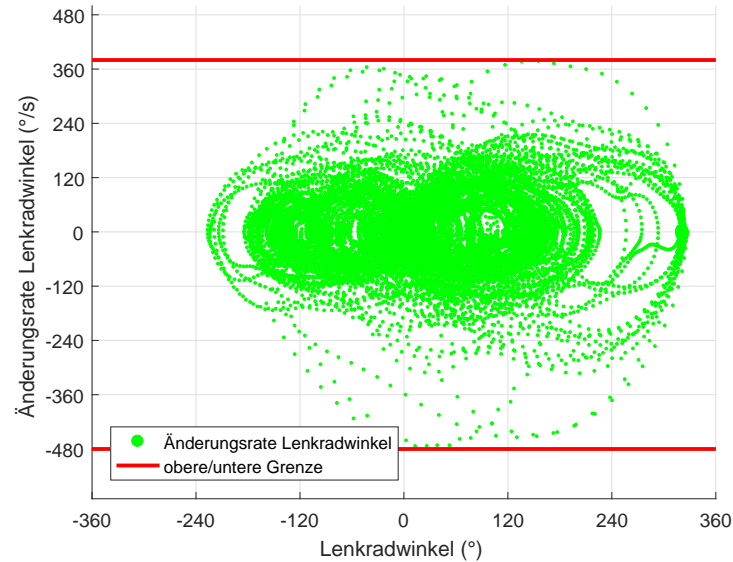


Abb. 12: Phasenportrait Lenkradwinkel

4.2 Ableitung der Vermittlungsfunktionen aus Versuchsdaten

In diesem Abschnitt soll ermittelt werden, wie sich die Eingaben des Fahrers in einer Änderung der Fahrzeugbewegung niederschlagen. Für den Bereich der Längsführung soll dabei ein Zusammenhang zwischen der Pedalstellung und der Beschleunigung des Fahrzeugs hergestellt werden, im Bereich der Querführung ist der Einfluss der Lenkradposition auf die Stellung der Vorderräder Gegenstand der Untersuchung. Die entsprechenden Übertragungsfunktionen sind notwendig um die Handlungsoptionen des Menschen in den Steuerungseingaben im Fahrzeugmodell abbilden zu können.

4.2.1 Längsführung

Zur Ermittlung eines Zusammenhangs zwischen Pedalstellung und Fahrzeugbeschleunigung werden die Beschleunigungswerte jeweils über die Stellung des Gaspedals und den Bremsdruck (vgl. Abb. 13) zu dieser Zeit aufgetragen. Es wurden dabei nur Beschleunigungen berücksichtigt, bei denen die bereits zuvor genutzten Schwellwerte von 0.2 % Gaspedalstellung und 0.75 bar Bremsdruck überschritten werden.

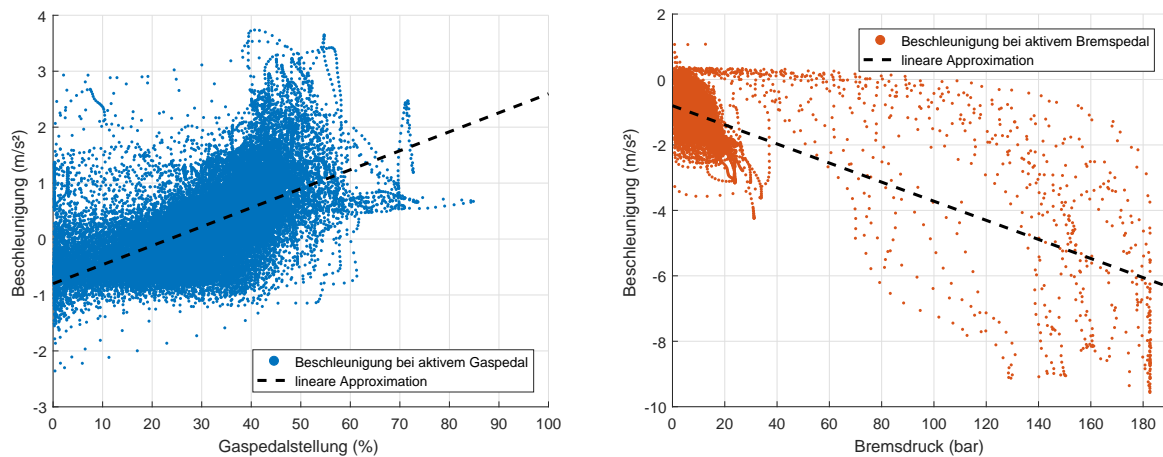


Abb. 13: Beschleunigung über Gaspedalstellung (links) bzw. Bremsdruck (rechts)

Es lässt sich insbesondere für große Werte kein linearer Zusammenhang zeigen, der Korrelationskoeffizient nach Bravais und Pearson¹ [43] beträgt 0.61 für den Zusammenhang von Gaspedalstellung und Beschleunigung und -0.73 für den Zusammenhang von Bremsdruck und Beschleunigung. Ohne Kenntnis des Motorkennfeldes und der Trägheiten im Antriebsstrang lässt sich für die Gaspedalstellung bedingt durch die Streuung der Messpunkte keine Aussage über eine Vermittlung in eine Fahrzeugbeschleunigung treffen. Der Bremsdruck könnte über eine degressive Kurve in die Beschleunigung umgerechnet werden [52], jedoch ist es auf Grund der geringen Anzahl und der weiten Streuung der Messpunkte bei hohen Bremsdrücken auch hierfür nicht möglich, die zugehörige Kennlinie mit hinreichender Genauigkeit zu identifizieren.

4.2.2 Querführung

Der Einfluss der Lenkradposition auf die Stellung der Vorderräder ergibt sich im realen Fahrzeug bei rein mechanischer Übertragung aus der Geometrie von Lenkung und Fahrwerk. Da in den Realversuchen in interactIVe das Versuchsfahrzeug FAS-Car verwendet wurde, ein mit einer steer-by-wire Lenkung ausgerüsteter Versuchsträger, kann grundsätzlich jede Funktion zur Umrechnung einer Lenkradstellung in einer Stellung der Vorderräder hinterlegt worden sein. In den Versuchsaufzeichnungen sind jedoch keine Informationen über die genutzte Übertragungsfunktion enthalten, weshalb diese für diese Arbeit aus den Messdaten gewonnen werden muss.

Auf Grund der fehlenden Information zur Stellung der Vorderräder in den Versuchsdaten

¹Mit diesem Koeffizienten lassen sich statistische Zusammenhänge auf einem Intervall von -1 bis 1 bewerten. Dabei bedeutet ein Wert von 1 direkte Proportionalität, -1 indirekte Proportionalität und 0 keinen linearen Zusammenhang

muss diese aus den übrigen Daten bestimmt werden. Dazu wird mit dem Fahrzeugmodell errechnet, welcher Lenkwinkel nötig war, damit das Fahrzeug seine Gierwinkelgeschwindigkeit entsprechend der Messdaten ändert. Um die Singularitäten des Fahrzeugmodells bei niedrigen Geschwindigkeiten zu umgehen, werden nur Messpunkte bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von mindestens 1.5 m/s in die Rechnung einbezogen. Das Ergebnis ist in Abb. 14 dargestellt. Dabei wurde der Lenkwinkel des Fahrzeugs gegenüber dem Lenkradwinkel angetragen, d.h. es ist die Stellung der Vorderräder über der Stellung dargestellt, in der sich das Lenkrad zu dieser Zeit befand.

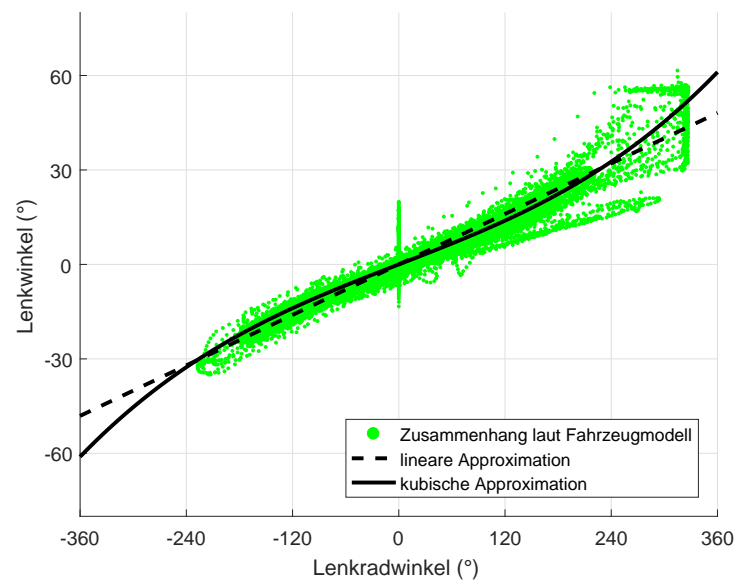


Abb. 14: Lenkwinkel über Lenkradwinkel mit verschiedenen Approximationen

Da davon auszugehen ist, dass das Fahrzeug bei neutraler Lenkradstellung geradeaus fährt, kann der Verlauf der Übertragungsfunktion durch den Ursprung angenommen werden. Durch Approximation der Messpunkte durch eine Ursprungsgerade und durch ein kubisches Polynom durch den Ursprung lassen sich zwei Kandidaten einer Übertragungsfunktion der Querführung identifizieren.

Unter der Annahme, dass das Lenkverhalten des Fahrzeugs auf Serienstand im Versuch abgebildet werden sollte, spiegelt der lineare Zusammenhang von Lenkrad- und Lenkwinkel dies am besten wieder, da ein VW Passat Variant B6 nicht mit Progressivlenkung lieferbar war (diese war erst bei späteren Modellen verfügbar [67]). Dazu kommt, dass der Unterschied zwischen beiden Funktionen, gerade bei kleinen und mittleren Lenkradwinkeln, nur klein ist und es deshalb sinnvoll ist, sich für die einfachere Darstellung des Zusammenhangs zu entscheiden. Die lineare Approximation ist auch durch den Korrelationskoeffizienten nach Bravais und Pearson von 0.97 gerechtfertigt. Sie entspricht außerdem dem angenommenen Zusammenhang in einem Einspurmodell [49]. In Formelschreibweise ergibt sich damit der in Gl. 14 dargestellte Zusammenhang zwischen

Lenkradwinkel δ_L und Lenkwinkel δ .

$$\delta = 0.1336 \delta_L \quad (14)$$

4.3 Bewertung und alternative Lösungen

Die Möglichkeiten zur Beeinflussung der Querführung durch einen menschlichen Fahrer lassen sich zufriedenstellend aus den Versuchsdaten ermitteln. Sowohl die maximale Änderungsrate der Lenkradstellung als auch der Zusammenhang zwischen Lenkradstellung und Lenkwinkel lassen sich brauchbar abschätzen. Der Betrag der maximalen Änderungsrate der Lenkradstellung ist mit einem Wert von 475 °/s jedoch kleiner als der in der US-Norm zur Wankstabilität („fishhook-Test“, vgl. Kap. 2.1.1) verwendete Wert von 720 °/s. Da der Wert aus der Norm durch umfangreiche Studien belegt ist [18] und Normen ein allgemein akzeptiertes Maß für Auslegungen im Sicherheitsbereich darstellen, soll in dieser Arbeit die maximale Änderungsrate der Lenkradstellung auch mit dem Wert von 720 °/s abgeschätzt werden. Vermittelt mit der Lenkübersetzung bedeutet dies eine maximal mögliche zeitliche Änderung des Lenkwinkels von 96.192 °/s. Geht man zudem von 1.5 möglichen Lenkradumdrehungen aus, so ergibt sich über die Lenkübersetzung ein maximaler Lenkwinkel von 72.144° im Fahrzeug.

Für den Bereich der Längsführung des Fahrzeugs konnte keine zufriedenstellende Abbildung der menschlichen Einflussmöglichkeiten gefunden werden. Zwar wurde die maximal mögliche Änderung der Gaspedalstellung und des Bremsdrucks abgeschätzt, eine Vermittlung dieser Werte in eine Änderung der Beschleunigung des Fahrzeugs ist in den Messdaten jedoch nicht geeignet hinterlegt. Der menschliche Einfluss auf die Fahrzeuglängsführung muss daher auf andere Art und Weise abgebildet werden.

Als Alternative soll der direkte Einfluss des Fahrers auf die Beschleunigung des Fahrzeugs im Versuch ohne Aufteilung in Einfluss auf Pedalstellung und deren Vermittlung bestimmt werden. Um trotzdem später eine Pedalwechselzeit berücksichtigen zu können, wird die Untersuchung in den drei Bereichen *Gaspedal betätigt*, *Bremspedal betätigt* sowie *kein Pedal betätigt* jeweils separat durchgeführt. Das Fahrzeug ist im Bereich *Gaspedal betätigt*, sobald der schon zuvor genutzte Schwellwert von 0.2 % Gaspedalstellung überschritten wird. Äquivalent dazu ist der Bereich *Bremspedal betätigt* definiert, in dem sich das Fahrzeug ab dem Überschreiten von 0.75 bar Bremsdruck befindet. Zu allen anderen Zeitpunkten wird das Fahrzeug dem Bereich *kein Pedal betätigt* zugeordnet. Um die Schwingungen des Fahrzeugs nach starker Bremsung nicht zu berücksichtigen, werden

in der Untersuchung nur Zeitpunkte mit einer Fahrzeuggeschwindigkeit von mindestens 1.5 m/s vor Überschreiten des Bremsdruckmaximums betrachtet.

Abb. 15 zeigt auf der linken Seite einen Plot der Fahrzeugbeschleunigung über die Fahrzeuggeschwindigkeit. Es lässt sich mit -2.40 m/s^2 eine untere Grenze für die bei betätigtem Gaspedal mögliche Beschleunigung finden. Trägt man die Änderung der Fahrzeugbeschleunigung, d.h. den Ruck des Fahrzeugs, über die Geschwindigkeit an, so ergibt sich dafür das rechts in Abb. 15 dargestellte Diagramm. Im Bereich *Gaspedal betätigt* kann der Ruck des Fahrzeugs unter Fahrereinfluss damit auf den Bereich von -5.15 m/s^3 bis 4.55 m/s^3 eingegrenzt werden.

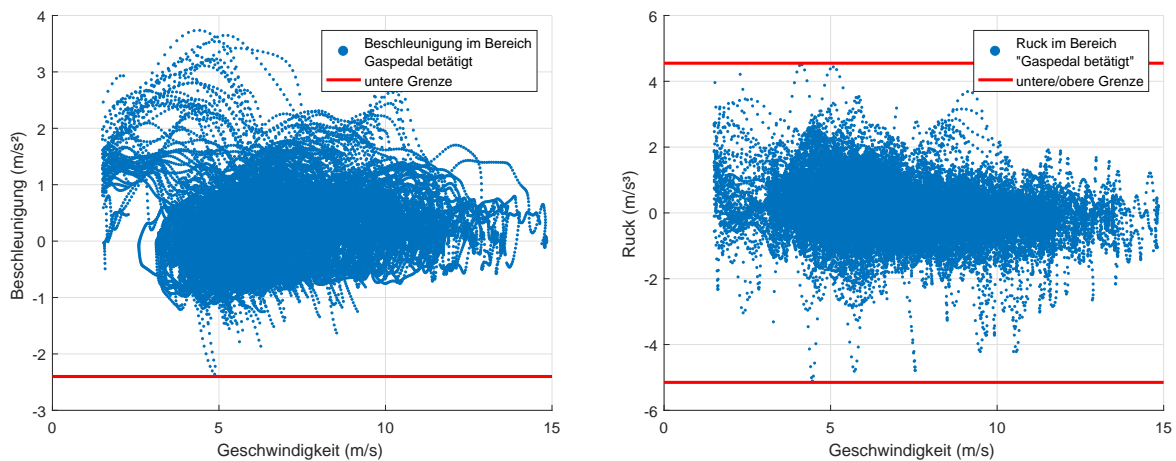


Abb. 15: Fahrzeugbeschleunigung (links) bzw. Fahrzeugruck (rechts) über Geschwindigkeit im Bereich *Gaspedal betätigt*

Im Bereich *kein Pedal betätigt* kann die Beschleunigung des Fahrzeugs wie links in Abb. 16 über seine Geschwindigkeit zum gleichen Zeitpunkt angetragen werden. Die Beschleunigung in diesem Bereich kann auf das Intervall $\pm 3.15 \text{ m/s}^2$ eingegrenzt werden. Der Plot von Ruck über Fahrzeuggeschwindigkeit ergibt die rechts in Abb. 16 gezeigte Darstellung. Der Fahrzeugruck ist stets auf das Intervall von -6.10 m/s^3 bis 5.70 m/s^3 beschränkt.

Die Untersuchung des Bereichs *Bremspedal betätigt* ergibt das links in Abb. 17 dargestellte Diagramm der Beschleunigung über die Fahrzeuggeschwindigkeit. Mit 1.10 m/s^2 lässt sich eine obere Grenze der Beschleunigung unter Bremswirkung finden. Dieser zunächst unerwartete Wert lässt sich durch die Beschleunigung des Fahrzeugaufbaus (in dem sich das Messgerät im Versuch befand) bei Einleitung des Bremsvorgangs erklären. Rechts in Abb. 17 ist der Fahrzeugruck gegenüber der Geschwindigkeit aufgetragen. Der Fahrzeugruck im Bereich *Bremspedal betätigt* kann damit auf das Intervall von -17.70 m/s^3 bis 5.55 m/s^3 eingegrenzt werden.

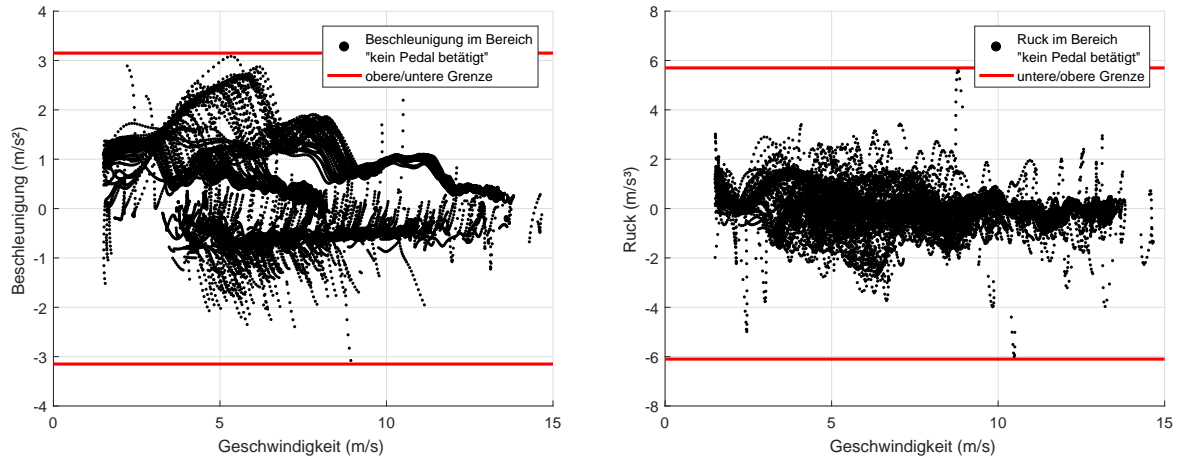


Abb. 16: Fahrzeugbeschleunigung (links) bzw. Fahrzeugruck (rechts) über Geschwindigkeit im Bereich *kein Pedal betätigt*

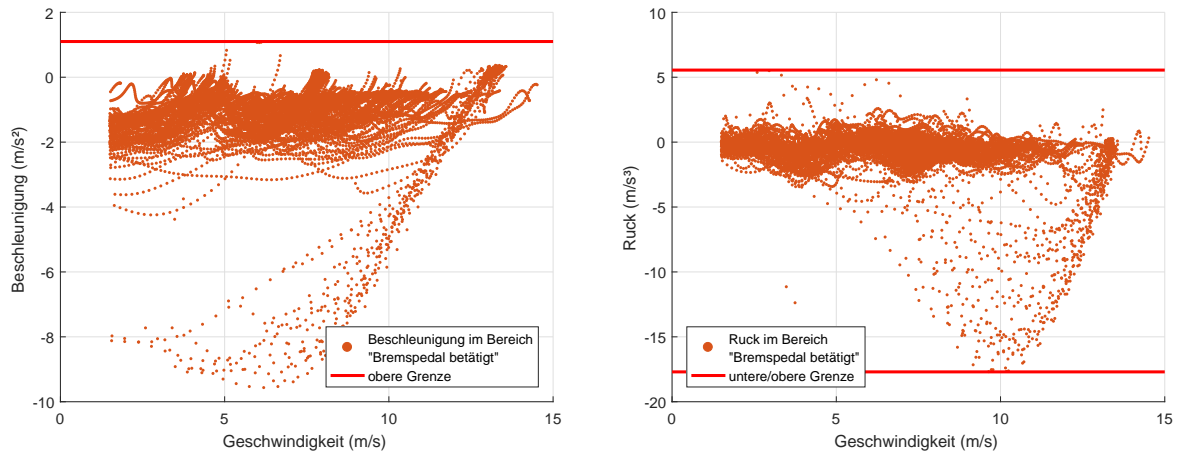


Abb. 17: Fahrzeugbeschleunigung (links) bzw. Fahrzeugruck (rechts) über Geschwindigkeit im Bereich *Bremspedal betätigt*

Mit dieser Auswertung der Fahrzeugbeschleunigung für die verschiedenen Bereiche konnte eine Abschätzung des Einflussvermögens des Menschen auf die Längsführung des Fahrzeugs gefunden werden. Diese ist geeignet, um einen menschlichen Fahrer in der Simulation zu modellieren.

Die ermittelten Parameter des Fahrermodells sind in Tab. 4 zusammengefasst. Diese entsprechen den zuvor aus den Messdaten gewonnenen Werten. Lediglich die maximale positive Änderung im Bereich *Gaspedal betätigt* wurde von $4.55 m/s^3$ auf $5.70 m/s^3$ erhöht, da es nicht logisch erscheint, dass der Fahrer die Beschleunigung unter Nutzung des Gaspedals weniger stark verändern kann, als er dies ohne Pedalnutzung kann. Der aus den Messdaten gewonnene Wert lässt sich vermutlich darauf zurückführen, dass im Versuch die Fahrer ihr größtmögliches Einflussvermögen auf die Gaspedalstellung nie ausgenutzt haben, da sie in den Gefahrensituationen eher mit Bremsen reagiert haben.

Die maximal und minimal mögliche Beschleunigung ist zudem über das Produkt aus Reibungskoeffizient μ und Ortsfaktor g beschränkt, da auf Grund der beschränkten Reibungskraft zwischen Reifen und Straße ab diesem Punkt keine Vergrößerung des Betrags der Beschleunigung mehr erreicht werden kann.

Tab. 4: Parameter des erstellten Fahrermodells

Parameter	Beschleunigung			Lenkradwinkel
	Gaspedal	kein Pedal	Bremspedal	
maximaler Wert	μg	3.15 m/s ²	1.10 m/s ²	72.144°
minimaler Wert	-2.40 m/s ²	-3.15 m/s ²	$-\mu g$	-72.144°
maximale positive Änderung	5.70 m/s ³	5.70 m/s ³	5.55 m/s ³	96.192 °/s
maximale negative Änderung	-5.15 m/s ³	-6.10 m/s ³	-17.70 m/s ³	-96.192 °/s
Mindestverweildauer im Bereich	-	100 ms	-	-

5 Sichere Manöverplanung (unter Berücksichtigung des menschlichen Fahrverhaltens)

In diesem Kapitel wird der Aufbau des Simulationsmodells zur sicheren Manöverplanung in Situationen drohender Kollision beschrieben. Dabei wird in Anlehnung an den Versuchsaufbau der in Kapitel 3.2 vorgestellten Studie des Projekts interactIVe von einem Hindernis auf der eigenen Spur ausgegangen, das sich über einen Teil dieser Spur erstreckt. Zum strukturierten Aufbau des Modells wird die Berechnung in Einzelschritte zerlegt. Zunächst soll ausgehend vom gegenwärtigen Zustandsraum des Fahrzeugs abgeschätzt werden, wie sich dieser unter Einfluss des menschlichen Fahrers in einem gewählten Zeitintervall verändern kann. Anschließend wird für den Zustand in der Mitte des errechneten Erreichbarkeitsmenge (Mitte des Zonotops) mit Hilfe einer Optimierung eine zulässige Trajektorie am Hindernis vorbei gesucht. In einem dritten Schritt wird ausgehend von der Menge der Zustände nach Fahrereinfluss eine Erreichbarkeitsanalyse entlang der Trajektorie ausgeführt. In der folgenden Berechnung wird die gefundene Lösung auf Richtigkeit, d.h. auf Einhaltung der Randbedingungen der Simulation geprüft und die Simulationsschritte bei Bedarf bis zum Finden einer gültigen Lösung oder dem Erreichen anderer Abbruchbedingungen wiederholt. Wird keine gültige Lösung gefunden, so würde in Realität die Interaktion des Fahrers mit dem Fahrzeug nicht mehr zugelassen und das Fahrzeug stattdessen mit dem letzten gültigen Notfallmanöver in einen sicheren Zustand, d.h. zum Stillstand, gebracht.

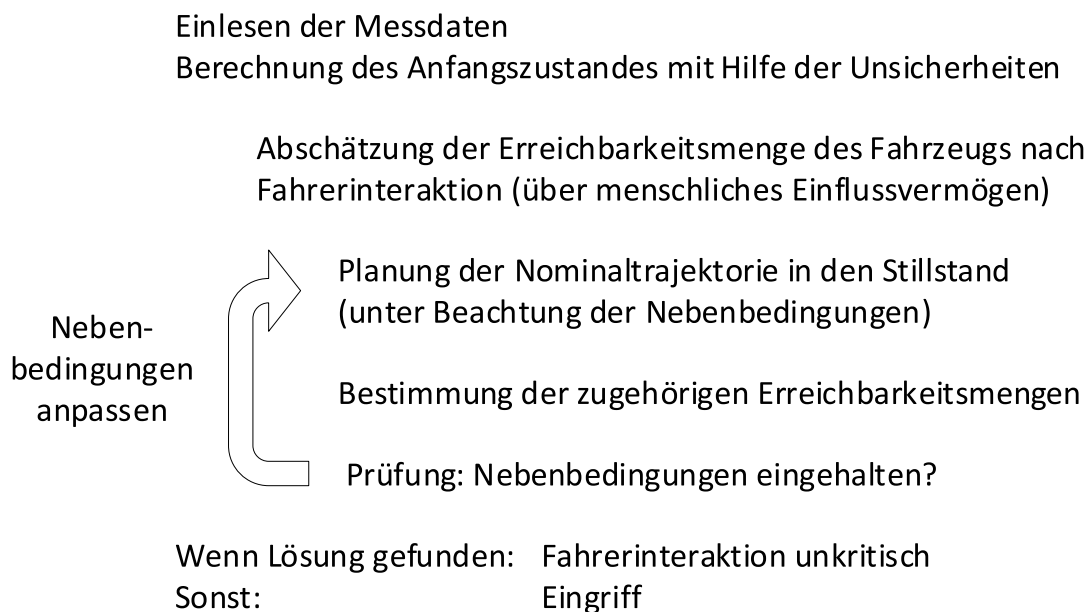


Abb. 18: Simulationsablauf in Einzelschritten

5.1 Berechnung menschlichen Einflussvermögens

Im ersten Schritt der Simulation muss ausgehend vom aktuellen Zustand des Fahrzeuges abgeschätzt werden, wie sich dieser im definierten Zeitintervall auf Grund der Beeinflussung durch einen menschlichen Fahrer verändern kann. Dazu soll zunächst das erstellte worst-case Modell des Fahrers in das Modell des Versuchsfahrzeuges FAS-Car integriert werden, bevor anschließend eine Umsetzung der Berechnung des menschlichen Einflussvermögens im Programm Matlab vorgestellt wird.

5.1.1 Zusammenführung des Fahrzeug- und Fahrermodells

Der Mensch kann den aktuellen Zustand des Fahrzeuges über zeitlich veränderbare Steuerungseingaben beeinflussen. Diese teilen sich auf in Einfluss auf die Längsführung und auf die Querrführung, die im Fahrzeugmodell über die beiden Steuerungseingaben Beschleunigung bzw. Lenkwinkel dargestellt sind. Um Unsicherheiten besser abbilden zu können, die den Fahrereinfluss und damit die Steuergrößen im System betreffen, soll im verwendeten Fahrzeugmodell im Gegensatz zum DLR-Fahrzeugmodell die angenommene Störung verändert werden. Anstelle der Störungen in Form von normierten Kräften in Längs- und Querrichtung ($e_{Fx}, e_{Fy,f}$ und $e_{Fy,r}$, vgl. Kap. 4) soll die Störung direkt auf die Steuereingaben wirken. Diese sollen entsprechend der verwendeten Symbolik als e_a und e_δ bezeichnet werden, wobei ihr Wert in Ablehnung an die in [25] beschriebenen Werte gewählt wird. Tabelle 5 zeigt die damit im Modell verwendeten maximalen Messfehler und Unsicherheiten.

Tab. 5: Maximale Messfehler und Unsicherheiten für das in der Simulation verwendete Fahrzeugmodell

e_x (m)	e_y (m)	e_Ψ (°)	e_Θ (°)	e_v (m/s)	e_ω (°/s)	e_a (m/s ²)	e_δ (°)
0.04	0.04	1	1	0.05	2	0.2	0.2

In Kap. 4 wurde gezeigt, dass der Mensch seine Steuerungseingaben nicht frei ändern kann, sondern dass ihm mögliche Änderungsraten sowohl nach oben als auch nach unten beschränkt sind.

Im Bereich der Längsführung lassen sich abhängig vom genutzten Pedal die Bereiche *Gaspedal betätigt*, *kein Pedal betätigt* und *Bremspedal betätigt* identifizieren, für die nur ein bestimmtes Beschleunigungsintervall zulässig ist. Zudem kann von *Gaspedal betätigt* nur über *kein Pedal betätigt* in *Bremspedal betätigt* gewechselt werden und umgekehrt,

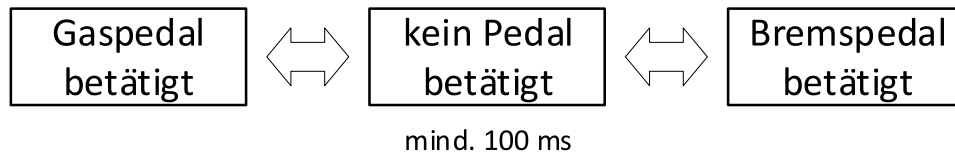


Abb. 19: Bereichsübergänge der verschiedenen Pedalbetätigungen

wobei auf Grund der Pedalwechselzeit mindestens 100 ms im Zwischenbereich verbracht werden müssen. In Abb. 19 ist dieser Zusammenhang nochmals dargestellt.

Ausgehend vom Wert der Steuerungseingaben zu Beginn der Simulation, die um die Unsicherheit des Wertes zu einem Intervall erweitert werden, sowie der Art der Pedalbetätigung (d.h. welcher Bereich gerade aktiv ist) kann damit die Entwicklung der menschlichen Steuerungseingaben über die Vorausschauzeit bestimmt werden. Im Folgenden soll in zwei Beispielen erläutert werden, wie sich das Intervall von Beschleunigung bzw. von Lenkwinkel bestimmt, das beschreibt, welchen Wert die Steuerungseingabe zu einem gewissen Zeitpunkt haben könnte. Die Intervalle werden umso größer, je weiter man in die Zukunft schaut.

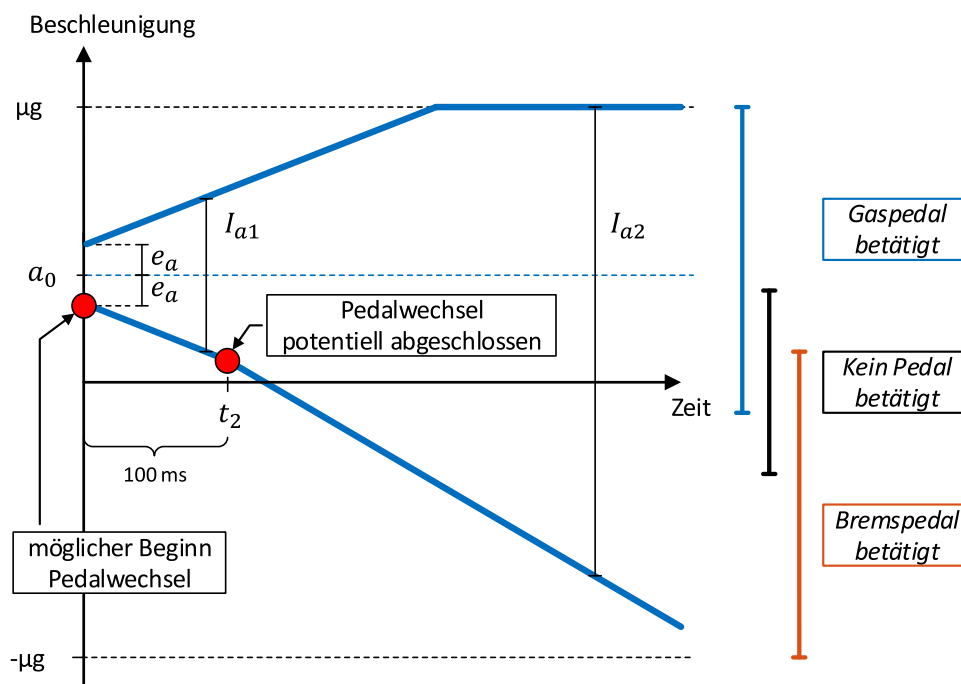


Abb. 20: Beschleunigungseingabe über Zeit

In Abb. 20 ist beispielhaft die Entwicklung der Beschleunigung über die Zeit dargestellt. Ausgehend vom Startwert a_0 , der beidseitig mit der Unsicherheit e_a behaftet ist, kann der Fahrer die Beschleunigung mit den in Tab. 4 beschriebenen Raten für ein gedrücktes Gaspedal verändern. Bereits zum Startzeitpunkt hat die untere Intervallgrenze

einen Wert, bei dem ein Pedalwechsel möglich ist. Das Intervall der möglichen Eingaben für die Fahrzeugbeschleunigung setzt sich somit als Vereinigung der Entwicklung der Beschleunigung für *Gaspedal betätigt* und für *kein Pedal betätigt* zusammen. 100 ms Simulationszeit später (in der Abbildung bei t_2) ist ein Pedalwechsel potentiell abgeschlossen, da dann die Mindestaufenthaltsdauer in *kein Pedal betätigt* absolviert wurde und die untere Intervallgrenze im Beschleunigungsbereich von *Bremspedal betätigt* liegt. Damit muss anschließend auch die Entwicklung für *Bremspedal betätigt* für das Intervall möglicher Beschleunigungseingaben berücksichtigt werden. Bei Erreichen des Maximal-/Minimalwertes wächst die Steuerungseingabe in diese Richtung nicht weiter an. Das Intervall der möglichen Beschleunigungseingabe des Fahrers ergibt sich zwischen dem größten und kleinsten möglichen Beschleunigungswert zum jeweiligen Zeitpunkt (vgl. z.B. I_{a1} und I_{a3}).

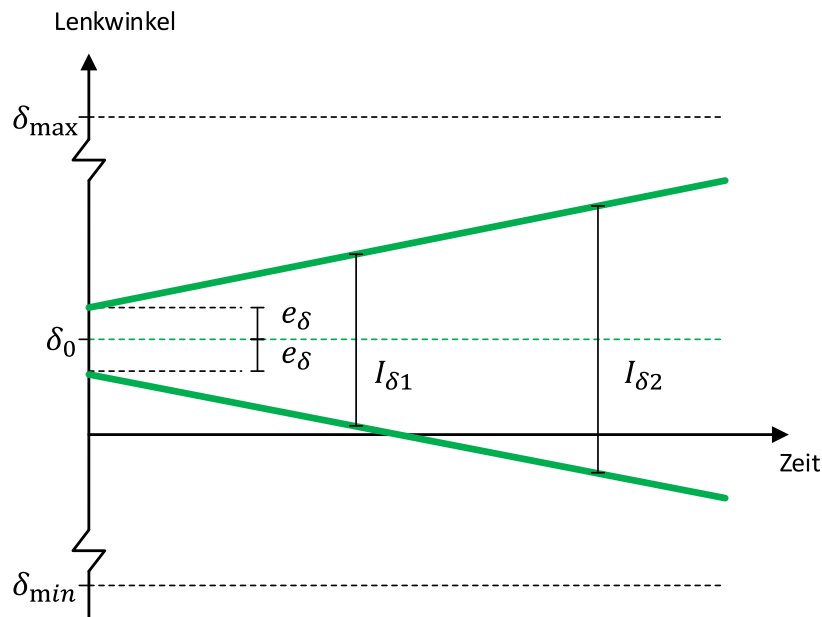


Abb. 21: Lenkwinkleingabe über Zeit

In Abb. 21 sieht man die Entwicklung des Lenkwinkels ausgehend von einem Startwert δ_0 , der beidseitig mit der Unsicherheit e_δ behaftet ist. Der Ausgangswert ändert sich pro Zeiteinheit nur jeweils mit den in Tab. 4 beschriebenen Raten. Der Lenkwinkel kann somit zum entsprechenden Zeitpunkt jeden Wert im Intervall $I_{\delta 1}$ annehmen. Im weiteren Zeitverlauf wird das Lenkwinkelintervall immer größer, bis z.B. zum zugehörigen Zeitpunkt das Intervall $I_{\delta 2}$ erreicht wird.

5.1.2 Umsetzung in Matlab

Die im vorherigen Abschnitt beschriebene Berechnungslogik soll nun als ausführbarer Algorithmus im Programm Matlab implementiert werden. Dies wurde in der Funktion *calculate_driverInfluence* umgesetzt.

$[X_1_center, Xode, Tode] = \text{calculate_driverInfluence}(x_0, err, foresight, pedalstatus)$

Die Funktion rechnet ausgehend von einem Vektor $x_0 \in \mathbb{R}^8$, der den Startzustand des Berechnungspunktes (Mitte der Hinterachse) in den sechs Dimensionen des Fahrzeugmodells (x-Position, y-Position, Ausrichtung, Geschwindigkeit in x-Richtung, Geschwindigkeit in y-Richtung, Änderungsrate der Ausrichtung) sowie die anfänglichen Steuerungseingaben für Beschleunigung und Lenkwinkel enthält.

$$x_0 = (p_x, p_y, \Psi, v_x, v_y, \omega, a, \delta)^T|_{t=t_0} \quad (15)$$

Zusätzlich wird die Unsicherheit für diese Zustandswerte im Vektor *err* übergeben, wobei die Einträge entsprechend der Angabe in x_0 angeordnet sind und die in Tab. 5 aufgelisteten Werte haben. Der Parameter *foresight* gibt in der Einheit Sekunden an, wie weit der Fahrereinfluss in die Zukunft simuliert werden soll. *pedalstatus* ist ein zweidimensionales Feld, wobei der erste Eintrag die Zeit seit der letzten Pedalbetätigung in der Einheit Sekunden angibt (negativer Wert bzw. leeres Feld für derzeit gedrücktes Pedal). Der zweite Eintrag beschreibt in Form einer Zeichenkette, welches Pedal zuletzt betätigt wurde ('brake' für das Bremspedal, 'accelerator' für das Gaspedal).

Aus den übergebenen Größen wird als Erstes die Erreichbarkeitsmenge des Ausgangszustandes als Zonotop mit dem Zentrum x_0 und den Generatoren in Form der Spalten einer Diagonalmatrix mit der Hauptdiagonale *err* bestimmt. In CORA wird danach in einer Schleife ausgehend von der jeweils vorherigen die neue Erreichbarkeitsmenge in Schritten von 1 ms berechnet, bis der Zeitpunkt *foresight* erreicht wurde. Dabei wird das Steuerungszonotop in der Rechnung in jedem Zeitschritt so angepasst, dass die Intervalle für Beschleunigung und Lenkwinkel der im vorherigen Abschnitt dargelegten Berechnungsweise entsprechen. Innerhalb eines Zeitschrittes sind die Intervalle der Steuerungseingaben nicht veränderlich, sondern sind auf den Wert zum Zeitpunkt der Mitte des Zeitintervalls gesetzt. Die in den Abbildungen 20 und 21 dargestellten Verläufe werden damit diskretisiert.

Bei der Berechnung in CORA werden die in Tab. 9 in Anhang B gezeigten Einstellungen und die in Kap. 2.3.1 beschriebene Fahrzeug-Differentialgleichung mit der zuvor erläuterten Anpassung der Störungen über die Funktion *vmodel_bicycle_openloop_abs_ext_driverInfluence* verwendet. Die Erreichbarkeitsmenge für den letzten Schritt wird im Zonotop *X_1_center* gespeichert. Sie gibt an, in welchem Zuständen sich der Berechnungspunkt des Fahrzeugs ausgehend vom unsicheren Startwert nach Beeinflussung durch einen menschlichen Fahrer nach der Zeit *foresight* befinden kann. Es werden außerdem die Lösungen *Xode* der Fahrzeug-Differentialgleichung ohne Fahrereingriff (Steuerungswerte bleiben auf dem Anfangszustand) zu den Zeitpunkten *Tode* bestimmt, wobei sich *Tode* als Folge von 0 bis *foresight* im Abstand 1 ms zusammensetzt. *X_1_center*, *Xode* und *Tode* werden als Ergebnis der Fahrervorausschau ausgegeben.

5.2 Bestimmung einer sicheren Trajektorie in den Stillstand

In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie sich aus dem Ergebnis der Fahrervorausschau eine sichere Trajektorie in den Stillstand unter Beachtung eines Kollisionshindernisses berechnen lässt. Dazu wird die Berechnung als Optimierungsproblem in ACADO formuliert, bevor genauer auf die in der Kalkulation genutzte Kostenfunktion eingegangen wird. Abschließend wird noch die Umsetzung in Matlab vorgestellt.

5.2.1 Formulierung als Optimierungsproblem

Um die bestmögliche Trajektorie in Sinne einer Kostenfunktion zu finden, wird die Berechnung als Optimierungsproblem formuliert. Es soll dabei ein Weg des Fahrzeugs gefunden werden, der alle Randbedingungen einhält (d.h. keine Kollision mit dem Hindernis, vernachlässigbare Geschwindigkeit am Ende, usw.). In der Berechnung wird der aktuelle Zustand durch die sechs Skalare definiert, die den sechs bekannten Zuständen für Positionen sowie Geschwindigkeiten des Fahrzeugmodells entsprechen. Zusätzlich sind wieder Beschleunigung und Lenkwinkel als Steuerungseingaben festgelegt.

Die Optimierung erfolgt unter der Nebenbedingung, dass das Fahrzeug seinen Zustand nur entsprechend der in Kap. 2.3.1 beschriebene Fahrzeug-Differentialgleichung (mit den zuvor erläuterten Anpassungen der Störung) verändert. Zusätzlich muss der Anfangszustand mit dem Ergebnis der Berechnung der Fahrervorausschau (Zentrum des Zonotops) übereinstimmen. Für das Ende der Optimierung wird gefordert, dass die Geschwindigkeit des Fahrzeugs in x-Richtung (vierter Eintrag im Zustandsvektor) einen Wert von 1.5 m/s hat. Dies entspricht nicht den für eine Trajektorie in den Stillstand erwarteten

0 m/s, verhindert jedoch Singularitäten in der Fahrzeug-Differentialgleichung, die bei sehr kleinen Geschwindigkeiten auftreten. Darüber hinaus ist das Ziel der Berechnung eine Trajektorie in einen sicheren Zustand zu finden. Bei einer Bewegungsgeschwindigkeit des Fahrzeugs mit 1.5 m/s, welche etwa Schrittgeschwindigkeit entspricht, kann davon ausgegangen werden, dass keine Gefahr mehr für das eigene Fahrzeug oder andere Verkehrsteilnehmer besteht und dass das Fahrzeug in sehr kurzer Zeit auch vollständig zum Stillstand gebracht werden kann (zum Vergleich: Bei einer Verzögerung von 7.5 m/s^2 kann eine Geschwindigkeit von 1.5 m/s in 200 ms abgebaut werden).

Als Initialisierung, d.h. als Basislösung des Problems, von dem ausgehend Verbesserungen gesucht werden sollen, dient die optimale Lösung vorhergehender Schritte (sogeannter „hot start“). Falls dahingehend keine Daten vorhanden sind, wird stattdessen mit einer Trajektorie initialisiert, die sich auf Grund von Steuerungseingaben in Form einer Beschleunigung von 80% der maximal möglichen Verzögerung bei Geradeausfahrt ($= -0.80 \mu g$) und einem Lenkwinkel von 0.05 rad (etwa 2.86° ; entspricht leichtem Lenken nach links) ergibt. Dies ermöglicht einen guten Ausgangspunkt für die Suche, so dass die Optimierung schnell ein gutes Ergebnis liefert.

5.2.2 Aufstellung der Kostenfunktion

Die Kostenfunktion, mit der jede Trajektorie anhand eines Skalars bewertet wird, setzt sich aus mehreren Teilen zusammen. Sie besteht einerseits aus finalen Kosten (engl. final costs), die nur den Endzustand einbeziehen, und andererseits aus laufenden Kosten (engl. running costs), die sich auf Grund der Bewegung während des Manövers errechnen.

Als finale Kosten J_f soll in der Berechnung die Manöverzeit T herangezogen werden, da nicht nur eine beliebige sichere Trajektorie gefunden werden soll, sondern diejenige, die das Fahrzeug schnellstmöglich in den sicheren Zustand bringt. Zur späteren Anpassung wird der Kostenwert noch mit einem Faktor w_f gewichtet.

$$J_f = w_f \cdot T \tag{16}$$

Die laufenden Kosten setzen sich aus der Summe von insgesamt vier Teilen zusammen. Der erste Teil beschreibt Kosten, die bei Überschneidung mit dem Hindernis entstehen. Das Hindernis wird dabei in Form einer verallgemeinerten Ellipse, einer sogenannten Superellipse [69], beschrieben. Diese nähert sich mit steigendem Grad einem Rechteck an, wobei Grad 2 einer gewöhnlichen Ellipse entspricht (vgl. Abb. 22).

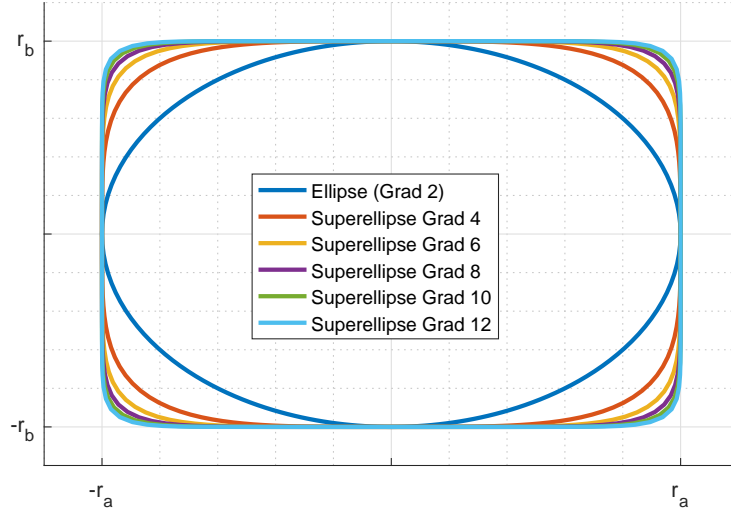


Abb. 22: Superellipsen verschiedenen Grades mit den Halbachsen r_a und r_b

In Polarkoordinaten kann der Radius r einer Superellipse mit den Halbachsen r_a und r_b vom Grad n unter einem Winkel φ , d.h. der Abstand zwischen Mittelpunkt und Rand, wie in Gl. 17 beschrieben werden.

$$r(\varphi) = \frac{r_a \cdot r_b}{\sqrt[n]{(r_b \cos \varphi)^n + (r_a \sin \varphi)^n}} \quad (17)$$

Falls der Berechnungspunkt mit den Koordinaten (p_x, p_y) innerhalb der Superellipse liegt, d.h. sein Abstand zum Zentrum (c_x, c_y) der Superellipse kleiner ist als der Radius $r(\varphi)$ unter dem Winkel φ der Verbindung zwischen (c_x, c_y) und (p_x, p_y) , dann entstehen Kosten für die Bewegung. Diese steigen quadratisch mit Stärke der Übertretung des Randes der Superellipse relativ zu ihrem Radius. Im Vergleich zu einer Berechnung basierend auf der absoluten Übertretung ermöglicht dies einerseits ein leichteres Finden eines geeigneten Gewichtungsfaktors, da die relative Übertretung stets einen Wert zwischen 0 und 1 hat, andererseits ist der Wert der Kostenfunktion nicht von der Größe des Hindernisses abhängig, was ein leichteres Skalieren seiner Abmaße erlaubt. Zusätzlich wird eine Unstetigkeit der Kosten im Zentrum der Ellipse vermieden. Unter Verwendung eines Gewichtungsfaktors w_{r1} und des Ellipsenradius aus Gl. 17 lassen sich die Kosten einer Hindernisverletzung damit zum Zeitpunkt t entsprechend Gl. 18 berechnen.

$$J_{r1}(t) = \begin{cases} w_{r1} \cdot \left(\frac{r(\varphi) - d}{r(\varphi)} \right)^2 & \text{für } d < r(\varphi) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \text{mit } d &= \sqrt{(p_x(t) - c_x)^2 + (p_y(t) - c_y)^2} \\ \varphi &= \arctan \left(\frac{p_y(t) - c_y}{p_x(t) - c_x} \right) \end{aligned}$$

Der zweite Teil der laufen Kosten setzt sich basierend auf den Steuerungseingaben während des Manövers zusammen. Grundsätzlich ist diejenige sichere Trajektorie besser, bei der der Betrag der Steuerungswerte im Zeitverlauf klein bleibt. Das gilt hier jedoch nicht für die Beschleunigung, da ja gerade eine starke Bremsung für eine schnellstmögliche Verringerung der Geschwindigkeit angestrebt wird. Dies bedeutet, dass ein stark negativer Wert der Beschleunigung eine Verringerung der Kosten zur Folge haben sollte. Zusätzlich muss sichergestellt werden, dass Steuerungseingaben ihre maximal zulässigen Werte nicht überschreiten. Für den Lenkwinkel δ wird dies durch zusätzliche Kosten ab 90% des maximal möglichen Lenkwinkels δ_{max} im Fahrzeug (vgl. Tab. 4) sichergestellt (ein sogenanntes soft constraint), für die Beschleunigung a wird stattdessen eine im folgenden Kapitel beschriebene Nebenbedingung der Optimierung (ein sogenanntes hard constraint) den Wert begrenzen. Die Kosten für die Steuerung zum Zeitpunkt t setzen sich damit wie in Gl. 19 beschrieben zusammen. Die Berechnung beinhaltet die Faktoren w_{r2a} , $w_{r2\delta}$ und $w_{r2\delta m}$ zur Gewichtung der einzelnen Summanden.

$$J_{r2}(t) = \begin{cases} w_{r2a} \cdot a(t) + w_{r2\delta} \cdot \delta(t)^2 + w_{r2\delta m} \cdot (|\delta(t)| - 0.9 \delta_{max})^2 & \text{für } |\delta(t)| \geq 0.9 \delta_{max} \\ w_{r2a} \cdot a(t) + w_{r2\delta} \cdot \delta(t)^2 & \text{sonst} \end{cases} \quad (19)$$

Der dritte Teil der laufenden Kosten errechnet sich entsprechend der Lage des Fahrzeugs zur Straße. Ziel ist es, das Fahrzeug stets in der Straßenmitte zu halten bzw. Ausweichmanöver in Fahrtrichtung nach links entsprechend der Straßenverkehrsordnung zu begünstigen. In $J_{r3}(t)$ werden deshalb Kosten zum Zeitpunkt t auf Grund der Lage des Fahrzeugs in Höhe der quadratischen Abweichung zur Vorzugslage in der Straßenmitte entsprechend Gl. 20 berechnet. Die Kosten bestimmen sich zur späteren Anpassung an den Rest der Rechnung wieder unter Berücksichtigung eines Gewichtungsfaktors w_{r3} . Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass die Koordinate p_y in der Bewegungsebene des Fahrzeug den lateralen Versatz nur Fahrspurmitte angibt, wobei positive Werte in Fahrtrichtung links und negative Werte rechts liegen (dies entspricht der Annahme, dass die x-Achse in

Fahrtrichtung zeigt). Bewegt sich das Fahrzeug in einem globalen Koordinatensystem in eine andere Richtung, dann kann durch Transformation auf p_y geschlossen werden.

$$J_{r3}(t) = \begin{cases} w_{r3} \cdot p_y(t)^2 & \text{für } p_y(t) > 0 \\ 1.1 w_{r3} \cdot p_y(t)^2 & \text{sonst} \end{cases} \quad (20)$$

Der vierten Teil der laufenden Kosten berechnet Kosten bei zu großen Kräften an den Reifen des Fahrzeugs, damit das Ergebnis der Optimierung auch dem physikalischen Verhalten eines realen Fahrzeugs entspricht. Es muss verhindert werden, dass ein Reifen im Modell größere Kräfte überträgt als dies durch den Reibschluss zwischen Reifen und Straße möglich ist. Da, wie in Kap. 2.3 beschrieben, das Fahrzeugmodell auf einem Einspurmodell basiert, wird dabei nur zwischen einem Hinter- und einem Vorderrad unterschieden. Zusätzlich wird bei der Belastung des Reifens der Kamm'sche Kreis zu Grunde gelegt, d.h. der Reifen kann in Längs- und Querrichtung gleich viel Kraft übertragen. Die normierten Radkräfte in Längsrichtung F_{xf} und F_{xr} an den Vorder- bzw. Hinterreifen ergeben sich entsprechend Gl. 21 aus der Gesamtbeschleunigung des Fahrzeugs a für den Zeitpunkt t aus einer Gleichgewichtsbetrachtung. Da ein Notfallmanöver simuliert werden soll, wird an dieser Stelle davon ausgegangen, dass sich Radkräfte in Längsrichtung vor allem durch Bremsen ergeben und somit an allen Rädern auftreten. Mögliche Abweichungen des Modells beim Beschleunigen (das Modell würde ein Fahrzeug mit Allradantrieb simulieren) sollen an dieser Stelle nicht berücksichtigt werden.

$$\begin{aligned} F_{x,f}(t) &= \frac{b}{L} \cdot a(t) \\ F_{x,r}(t) &= \left(1 - \frac{b}{L}\right) \cdot a(t) \end{aligned} \quad (21)$$

Überschreitet der Betrag der am Reifen wirkenden Beschleunigung, d.h. der Betrag der addierten Vektoren von übertragender Längs- und Querb beschleunigung, einen festgelegten Anteil s (beim ersten Durchlauf 90%) der auf Grund der Reibung an diesem Ort übertragbaren Beschleunigung, so entstehen Kosten in Höhe der quadratischen Größe der Überschreitung. Damit ergeben sich wie in Gl. 22 die Kosten durch hohe Radkräfte $J_{r4f}(t)$ und $J_{r4r}(t)$ zum Zeitpunkt t an Vorder- bzw. Hinterachse unter Verwendung von Reibungskoeffizient μ zwischen Reifen und Straße, von Ortsfaktor g sowie den aus den Gleichungen 5 und 6 bekannten normierten Querkraften $F_{y,f}$ und $F_{y,r}$ an den entsprechenden Achsen.

$$\begin{aligned}
 J_{r4f}(t) &= \begin{cases} \left(\sqrt{F_{x,f}^2 + F_{y,f}^2} - s \frac{b}{L} \mu g \right)^2 & \text{für } \sqrt{F_{x,f}^2 + F_{y,f}^2} > s \frac{b}{L} \mu g \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \\
 J_{r4r}(t) &= \begin{cases} \left(\sqrt{F_{x,r}^2 + F_{y,r}^2} - s \left(1 - \frac{b}{L}\right) \mu g \right)^2 & \text{für } \sqrt{F_{x,r}^2 + F_{y,r}^2} > s \left(1 - \frac{b}{L}\right) \mu g \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{22}$$

Die Gesamtkosten J_{r4} für zu große Radkräfte berechnen sich aus der Summe der Einzelkosten an den jeweiligen Achsen, die noch mit einem Gewichtungsfaktor w_{r4} multipliziert werden (vgl. Gl. 23).

$$J_{r4}(t) = w_{r4} \cdot (J_{r4f}(t) + J_{r4r}(t)) \tag{23}$$

Damit können nun, wie in Gl. 24 dargestellt, die laufenden Kosten $J_r(t)$ zum Zeitpunkt t als Summe der Teilkosten bestimmt werden. Die Gesamtheit der laufenden Kosten $J_{r,ges}(t)$ ergibt sich als Integral bis zum entsprechenden Zeitpunkt.

$$\begin{aligned}
 J_r(t) &= J_{r1}(t) + J_{r2}(t) + J_{r3}(t) + J_{r4}(t) \\
 J_{r,ges}(t) &= \int_0^t J_r(\bar{t}) d\bar{t}
 \end{aligned} \tag{24}$$

Die Gesamtkosten J eines Manövers der Dauer T errechnen sich durch Addition der finalen Kosten mit der Gesamtheit der laufenden Kosten am Ende des Manövers (vgl. Gl. 25).

$$J = J_f + J_{r,ges}(T) = J_f + \int_0^T J_r(t) dt \tag{25}$$

5.2.3 Umsetzung in Matlab

Zur Berechnung wird die zuvor vorgestellte Logik in Matlab unter Verwendung des Toolkits ACADO implementiert. Dies wurde in der Funktion `calculate_trajectory` umgesetzt.

$$\begin{aligned}
 [trace_raw] &= calculate_trajectory(X_1_center, scaling_constraint, \\
 &\quad scaling_wheelforces, trace_raw_old)
 \end{aligned}$$

Dabei werden das Zonotop X_1_center , das das Ergebnis der Fahrervorausschau darstellt, die Skalierungsfaktoren $scaling_constraint$ und $scaling_wheelforces$, die später eine Aufdickung des Hindernisses und die Planung einer Trajektorie mit geringeren Radkräften ermöglichen, sowie die Trajektorie der vorherigen Berechnung $trace_raw_old$ übergeben. In der ersten Rechnung ist $trace_raw_old$ ein leeres Feld.

Zur Optimierung einer Trajektorie vorbei an einem Hindernis wird das Toolkit ACADO genutzt. Zu Beginn werden insgesamt sieben Zustände definiert, die den zuvor genutzten sechs Einträgen des Fahrzeugzustandes und einem Eintrag für den aktuellen Kostenwert $J_{r,ges}(t)$ entsprechen. Zusätzlich werden neben zwei Steuerungsvariablen für Beschleunigung und Lenkwinkel des Fahrzeugs auch drei Variablen definiert, die Berechnungsparameter darstellen. Davon beschreibt der erste die Manöverdauer T und der zweite den Skalierungsfaktor für das Hindernis und der dritte den Skalierungsfaktor für die Radkräfte während der Berechnung. In der Rechnung werden nach dem Startpunkt insgesamt 50 weitere Punkte bestimmt.

Die Optimierung muss dabei folgende Nebenbedingungen einhalten: Der Zustand des Fahrzeugs darf sich nur entsprechend dem Fahrzeugmodell in der Funktion `vmodel_bicycle_openloop_abs_ext_acado` verändern. Das Modell ist dabei identisch zum zuvor genutzten Modell in der Funktion `vmodel_bicycle_openloop_abs_ext_driverInfluence`, es wurde lediglich der siebte „Fahrzeugzustand“ $J_{r,ges}(t)$ ergänzt, womit auch alle laufenden Kostenfunktionen im Fahrzeugmodell enthalten sind. Zusätzlich wird gefordert, dass der Fahrzeugzustand zu Beginn mit dem Zentrum des Zonotops X_1_center übereinstimmt und dass die Kosten zu diesem Zeitpunkt den Wert 0 haben. Am Ende der Trajektorie muss sich das Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit in x-Richtung von 1.5 m/s bewegen. Darüber hinaus muss die Manöverzeit zwischen 0 und dem doppelten der Dauer des Manövers liegen, mit dem die Optimierung initialisiert wird. Außerdem wird gefordert, dass die Fahrzeugbeschleunigung im Intervall von $\pm\mu g$ liegt und dass die Skalierungsfaktoren ihre Werte zu Beginn der Simulation zu allen Zeitpunkte beibehalten. Als Optimierungsziel sind in der Rechnung die Gesamtkosten möglichst klein zu halten. Die in der Optimierung genutzten, durch iteratives Testen ermittelten Gewichtungsfaktoren sind in Tab. 6 dargestellt. Die Einheiten der Faktoren sind dabei so zu wählen, dass der Kostenwert einheitenlos wird.

In der Simulation wird für die Darstellung der Hindernisses eine Superellipse vom Grad 4 verwendet (d.h. $n=4$ in Gl. 17). Diese Wahl stellt einen Kompromiss zwischen einer möglichst rechteckigen Darstellung des Hindernisses und der Vermeidung numerischer Fehler durch große Exponenten dar. Als Halbachsen der Ellipse werden jeweils die halbe Breite und die halbe Dicke des Hindernisses verwendet, wobei r_a noch um den Abstand

Tab. 6: Für die Optimierung genutzte Gewichtungsfaktoren

Gewichtungsfaktor	Wert
w_f	0.5
w_{r1}	15
w_{r2a}	0.00001
$w_{r2\delta}$	0.00001
$w_{r2\delta m}$	100
w_{r3}	0.00001
w_{r4}	1

des Berechnungspunktes von der Vorderkante des Fahrzeugs plus einen Sicherheitsabstand von 0.7 m und r_b um die halbe Breite des Fahrzeugs plus einen Sicherheitsabstand von 0.8 m erhöht wird. Pro zusätzliche Stufe von *scaling_constraint* werden die Halbachsen in der Rechnung zudem um 0.5 m vergrößert.

Der Wert von *scaling_wheelforces* beeinflusst den Anteil s der nutzbaren maximalen Radkraft bevor Kosten entstehen. Pro zusätzliche Stufe des Skalierungsfaktors sinkt s um fünf Prozentpunkte.

Abweichend von den Standardeinstellungen wird die Optimierung abgeschlossen, wenn die Verbesserung des Kostenwertes im Vergleich zum vorherigen Schritt kleiner als 10^{-4} wird. Außerdem wird als Integrator in der Optimierung an Stelle eines expliziten Verfahrens das implizite Verfahren BDF verwendet. Dies ist dadurch bedingt, dass die der Optimierung zu Grunde liegende Differentialgleichung (d.h. verwendete Fahrzeugmodell) durch Hinzufügen der Kosten bereichsweise sehr steif wird. Das bedeutet, dass sich der Kostenwert in Abhängigkeit des Fahrzeugzustandes für bestimmte Zustände auch bei kleinen Änderungen sehr stark ändert (z.B. bei Überschreiten der zulässigen Radkraft).

Die Optimierung wird mit der letzten vorhandenen Lösung initialisiert, wobei die Kosten ausgehend von jetzigen Anfangszustand neu bestimmt werden. Gibt es keine bestehende Lösung wird stattdessen mit einer Trajektorie initialisiert, bei der das Fahrzeug mit 80% der maximalen Verzögerung bremst und dabei leicht nach links lenkt.

Das Resultat der Optimierung wird in der Variable *trace_raw* gespeichert und als Ergebnis der Funktion *calculate_trajectory* ausgegeben.

5.3 Erreichbarkeitsanalyse der Trajektorie

Um zu wissen, in welchen Bereichen sich das Fahrzeug während des Manövers aufhalten kann, muss eine Erreichbarkeitsanalyse entlang der Trajektorie durchgeführt werden.

Diese beinhaltet einen Regler, der das Fahrzeug entlang der im vorherigen Schritt berechneten Trajektorie führt, wobei der Anfangszustand der Erreichbarkeitsmenge nach Fahrereinfluss entspricht und während des Manövers fortlaufend Unsicherheiten auftreten. Im Folgenden wird zunächst beschrieben, wie sich die Berechnungslogik mit CORA formulieren lässt, bevor anschließend auf die Umsetzung in Matlab eingegangen wird.

5.3.1 Formulierung der Erreichbarkeitsanalyse

Bei der Berechnung in CORA kann das schon aus der Fahrervorausschau bekannte Fahrzeugmodell verwendet werden, nur dass sich die Steuerungseingaben Beschleunigung und Lenkwinkel diesmal als Ergebnis des Reglers und nicht als potentielle Handlung eines Menschen ergeben.

Ausgehend von der Erreichbarkeitsmenge zu Beginn in Form des Zonotops $Z_{0,k} = \langle c_0, G_0 \rangle$ des unregelten und ungestörten Systems, sollen diese beiden Beeinflussungen berücksichtigt werden. Bei einem linearem Regler, beschrieben durch die Funktion $c(x, x_{ref}) = -K^* \cdot (x - x_{ref})$ mit linearer Verstärkung $K^* \in \mathbb{R}^{n \times m}$ und der Differenz von Zustand des Fahrzeugs x im Vergleich zum Zustand in der Referenztrajektorie x_{ref} , kann die Verstärkung direkt aus der Gleichung abgelesen werden. Ist die Funktion c nicht linear, so kann die Verstärkung zum Zeitpunkt t_k mit $K^* = -\partial c / \partial x$ durch Linearisierung um c_0 und $x_{ref,k}$ bestimmt werden. Damit lässt sich der Zustandsraum $Z_{0,k}^*$ zu Beginn inklusive Steuerungseingaben entsprechend Gl. 26 unter Berücksichtigung der Unsicherheit e formulieren. [30]

$$Z_{0,k}^* = \left\langle \begin{pmatrix} c_0 \\ u_{ref,k} - K^* \cdot (c_0 - x_{ref,k}) \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} G_0 & 0 \\ -L \cdot G_0 & -K^* \cdot \text{diag}(e) \end{pmatrix} \right\rangle \quad (26)$$

Ausgehend davon kann nun die Erreichbarkeitsanalyse bis zum Ende des Zeitschritts ausgeführt werden. Das Ergebnis in Form eines Zonotops stellt die Basis $Z_{0,k+1}$ für den folgenden Berechnungsschritt dar, wobei es, vor dem erneuten Durchführen der Erreichbarkeitsanalyse im nächsten Zeitschritt, wieder geregelt und gestört wird.

5.3.2 Umsetzung in Matlab

Die Erreichbarkeitsanalyse wurde in Matlab unter Zuhilfenahme der Toolbox CORA in der Funktion `calculate_reachables_center` umgesetzt.

$$[X_ns_center, Xode_trace, Tode_trace] = calculate_reachables_center(X_1_center, trace, err)$$

Die Funktion rechnet ausgehend vom Zonotop X_1_center (dem Ergebnis der Erreichbarkeitsanalyse der Fahrervorausschau) von $trace$, dem Ergebnis der Planung einer optimalen Trajektorie und von err , der vektoriellen Unsicherheit von Zustand und Steuerung des Fahrzeugs, die schon in den vorherigen Berechnungen verwendet wurde. Die Matrix $trace \in \mathbb{R}^{K+1 \times m+n+1}$ fasst zeilenweise die Informationen Zeitpunkt t_k , Zustand x_k^\top und Steuerung u_k^\top des Startpunktes ($k = 0$) sowie der folgenden K Punkte der zuvor berechneten optimalen Trajektorie zusammen. Dabei gilt $t_0 = 0$ und $t_K = T$, d.h. es werden Start- und Endpunkt des Manövers, sowie $K - 1$ Zwischenwerte genutzt.

$$trace = \begin{pmatrix} t_0 & x_0^\top & u_0^\top \\ t_1 & x_1^\top & u_1^\top \\ & \vdots & \\ t_K & x_K^\top & u_K^\top \end{pmatrix}$$

mit $x_k^\top = (p_x, p_y, \Psi, v_x, v_y, \omega)|_{t=t_k}$
 $u_k^\top = (a, \delta)|_{t=t_k}$

In der Rechnung hat ein Zeitschritt die Länge 0.67 ms, wobei dies ggf. leicht angepasst wird, damit genau der Trajektorienpunkt verwendet werden kann. Die Zeitschrittlänge wird ab 70% der Manöverzeit auf ein Fünftel und ab 95% auf ein Dreißigstel verkürzt, um auch zum Ende der Manövers noch eine Konvergenz der Erreichbarkeitsberechnung zu gewährleisten. Auf Grund der erwarteten Vergrößerung der Erreichbarkeitsmengen im Zeitverlauf bedingt durch den Einfluss der Unsicherheiten droht sonst, dass kein Ergebnis mehr bestimmt werden kann und der Algorithmus die Menge in immer kleinere Bereiche „splittet“ (bis eine Abbruchbedingung in Form einer maximalen Rekursionstiefe erreicht wird).

Damit eine Berechnung stattfinden kann, muss zunächst der Trajektorienpunkt zu Beginn jedes Zeitschritts bestimmt werden. Dazu wird für die entsprechenden Zeitpunkte die Differentialgleichung des geregelten Fahrzeugmodells in der Funktion *vmodel_bicycle_lincontrol_ff_mk* (vgl. Kap. 2.3.2) jeweils zwischen zwei bekannten Punkten in $trace$ gelöst. Alle Zustände und Steuerung mit dem zuvor bestimmten zeitlichen Abständen werden zeilenweise in der Variable $Xode_trace$ gespeichert, die zugehörigen Zeitpunkte in der Variable $Tode_trace$ abgelegt.

Über eine Schleife kann nun für jeden Trajektorienpunkt mit Hilfe der Toolbox CORA eine Erreichbarkeitsanalyse durchgeführt werden. Zunächst wird dazu über numerische Ableitung die Verstärkung K^* bestimmt und damit aus dem Ergebnis $Z_{0,k}$ des vorherigen Zeitschrittes das Zonotop $Z_{0,k}^*$ nach Gl. 26 bestimmt. Im ersten Schritt wird das Ergebnis der Fahrervorausschau als $Z_{0,0}$ genutzt. Anschließend kann die Erreichbarkeitsanalyse in CORA mit den in Tab. 10 in Anhang B notierten Parametern durchgeführt werden. Im Vergleich zur Fahrervorausschau wird dabei ein größerer Fehler und Zonotope höherer Ordnung zugelassen, um auf Kosten einer Überapproximation ein zu starkes „splitten“ der Zonotope in der Rechnung zu vermeiden und so die Konvergenz der Rechnung nicht zu gefährden.

Die Ergebnisse der Analyse, d.h. die berechneten Zonotope, werden im Cell-Array X_ns_center gespeichert. Die Zonotope für die zusätzlichen Berechnungspunkte entlang der Trajektorie ab 70% und 95% der Manöverzeit werden danach aus dem Feld wieder entfernt, so dass X_ns_center aus Erreichbarkeitsmengen mit einem äquidistanten zeitlichen Abstand von 0.67 ms besteht. Als Ergebnis der Funktion *calculate_reachables_center* werden die Variablen X_ns_center , $Xode_trace$ und $Tode_trace$ ausgegeben.

5.4 Überprüfung der Lösung auf Korrektheit

Zum Schluss der Berechnung muss ermittelt werden, ob das gefundene Manöver den Anforderungen entspricht oder ob die Rechnung erneut mit veränderten Annahmen durchgeführt werden muss. Dazu wird zum einen geprüft, ob das Fahrzeug entlang seiner Trajektorie unter dem geforderten Maximum der Radkräfte bleibt. Zum anderen muss sichergestellt werden, dass das Fahrzeug nicht mit dem Hindernis kollidiert, d.h. dass sich der mögliche Aufenthaltsbereich des Gesamtfahrzeugs nicht mit dem Hindernis überlappt.

5.4.1 Überprüfung auf Einhaltung der maximalen Radkräfte

Zur Überprüfung, ob das Fahrzeug im Manöver die maximalen Radkräfte einhält, können die Trajektorienpunkte herangezogen werden. Da Zustand und Steuerungswerte zum jeweiligen Zeitpunkt bekannt sind, kann mit Hilfe der Gleichungen 5, 6 sowie 21 und der Bestimmung der Länge der addierten Vektoren in Längs- und Querrichtung die Kraft an Vorder- und Hinterrad im Modell berechnet werden. Diese wird dann mit der maximal möglichen (normierten) Kraft verglichen, die sich aus dem Produkt der jeweiligen relativen Achslast mit Reibungskoeffizient μ und Ortsfaktor g ergibt. Das Manöver ist aus

Sicht dieser Überprüfung gültig, wenn die Radkraft an keiner Achse zu keinem Zeitpunkt größer als der jeweilige Maximalwert wird.

5.4.2 Überprüfung auf Überschneidung mit dem Hindernis

Zur Überprüfung, ob sich das Fahrzeug entlang seiner Trajektorie mit dem Hindernis überschneidet, muss zuerst die Erreichbarkeitsmenge des Gesamtfahrzeugs bestimmt werden. Dabei ist vor allem die Menge der Punkte interessant, in denen sich Teile des Fahrzeugs aufhalten können, d.h. die Ausdehnung der Erreichbarkeitsmenge in der x-y-Ebene. Die Zustandsänderung des Fahrzeugs, wie z.B. seine Geschwindigkeit, sind für diese Prüfung dagegen nicht relevant.

Zur Umrechnung des Zonotops, das die Erreichbarkeitsmenge des Berechnungspunktes repräsentiert, wird zu Beginn die mittlere Ausrichtung des Fahrzeugs, d.h. der Eintrag im Zentrum des Zonotops für die Winkelkoordinate, und die maximale Abweichung davon ermittelt. Diese wird dabei über die Summe des Betrags der Einträge der Generatoren entlang der Winkelkoordinate abgeschätzt. Dreht man ein Rechteck, das durch die Abstände der Fahrzeugkanten vom Berechnungspunkt im Fahrzeug definiert wird (vgl. Abb. 5 für die jeweiligen Abmessungen), mit Hilfe einer Rotationsmatrix über alle Winkel deren Betrag kleiner ist als der Betrag der zuvor ermittelten maximalen Winkelabweichung, so erhält man den Bereich, in dem sich das Fahrzeug befinden kann. Der gesamte mögliche Aufenthaltsraum wird aus Gründen der Einfachheit (konservativ) durch ein einziges Rechteck abgeschätzt (vgl. Abb. 23). Für die weitere Rechnung wird das Rechteck in seine Zonotopen-Darstellung überführt.

Anschließend addiert man das Zonotop der ursprünglichen Erreichbarkeitsmenge des Berechnungspunktes und das Rechteck in Zonotopendarstellung über ihre Minkowski-Summe [9]. Wenn das Zentrum des sich ergebenden Zonotops noch um den Abstand zwischen Berechnungspunkt und Rechteckzentrum verschoben wird, so erhält man eine Abschätzung für den Aufenthaltsraum des Gesamtfahrzeugs. Dies lässt sich für jede Erreichbarkeitsmenge durchführen, so dass damit alle Aufenthaltsräume des Gesamtfahrzeugs entlang der Trajektorie berechnet werden können.

Die zuvor bestimmten Aufenthaltsräume des Gesamtfahrzeugs entlang der Trajektorie sollen nun auf Überschneidung mit dem Kollisionshindernis geprüft werden. Für eine schnelle Rechnung wird ein dreistufiger Prozess mit steigender Genauigkeit durchgeführt, da davon auszugehen ist, dass zu vielen Zeitpunkten eine grobe Abschätzung ausreichend ist, um die leere Schnittmenge nachzuweisen.

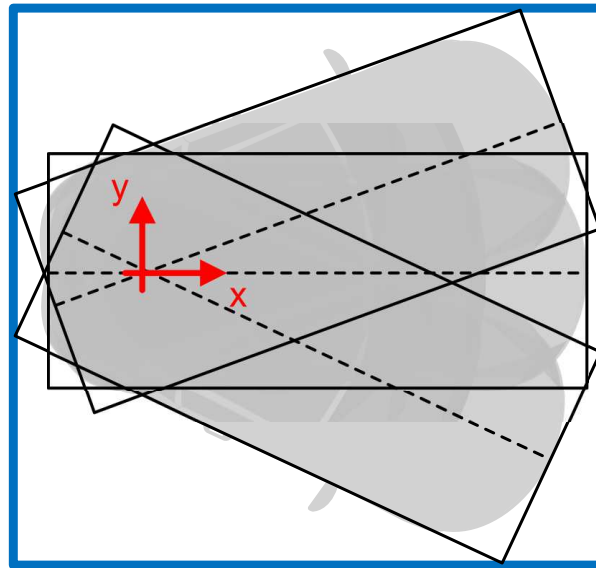


Abb. 23: Bildung Aufenthaltsraum des Gesamtfahrzeugs über Aufenthaltsbereiche bei verschiedenen Ausrichtungen

In einer ersten groben Prüfung wird sowohl der Aufenthaltsraum des Fahrzeugs als auch das Hindernis grob über Rechtecke abgeschätzt (vgl. Abb. 24). Die Eckpunkte der Rechtecke lassen sich in einfacher Weise über das Finden des minimalen/maximalen Wertes der x- bzw. y-Koordinate aller eingeschlossenen Punkte finden. Für Zonotope erreicht man dies durch Aufsummieren der Beträge aller Einträge in den Generatoren entlang der entsprechenden Koordinate. Im Falle des Hindernisses werden mit Hilfe von Gl. 17 und anschließender Projektion die kartesischen Koordinaten der Randpunkte gebildet und von diesen die Extrema gesucht. Zwei Rechtecke überschneiden sich genau dann, wenn mindestens ein Eckpunkt eines Rechtecks innerhalb des anderen liegt, d.h. wenn die Koordinaten des Eckpunktes innerhalb der von den Eckpunkten des zweiten Rechtecks aufgespannten Intervallen für x- und y-Koordinate liegen. Eine derartige Prüfung kann sehr schnell durchgeführt werden, da nur wenige Punkte überprüft werden müssen. Bei allen Aufenthaltsräumen, deren Rechteckabschätzung sich nicht mit der Rechteckabschätzung des Hindernis überschneidet, kann dies auch für die ursprünglichen Räume ausgeschlossen werden, d.h. hier muss keine weitere Prüfung stattfinden.

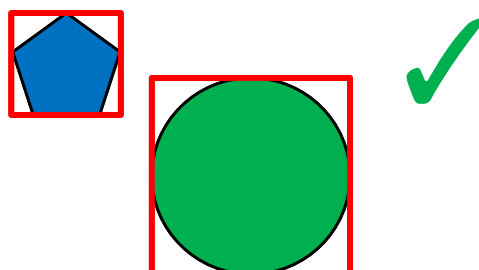


Abb. 24: Erste Methode zum Prüfen auf Überschneidung mit dem Hindernis

Für alle Aufenthaltsräume des Fahrzeugs, für die eine Überschneidung über die Rechteckabschätzung nicht ausgeschlossen werden kann, wird eine zweite Prüfung durchgeführt (vgl. Abb. 25). Diese überprüft, ob der Mittelpunkt eines Aufenthaltsraumes innerhalb des Hindernisses liegt, da, wenn dies für diesen Punkt nachgewiesen werden kann, eine Überschneidung der Bereiche stattfindet. Für die Prüfung wird Richtung und Abstand des Mittelpunktes gegenüber dem Zentrum der Superellipse, das das Hindernis repräsentiert, ermittelt und mit der Größe des Hindernis in dieser Richtung (über Gl. 17) verglichen. Ist der Abstand des Mittelpunktes zum Zentrum der Superellipse kleiner als der Radius der Superellipse, dann liegt der Mittelpunkt des Aufenthaltsraumes im Hindernis und es liegt eine Überschneidung beider Bereiche vor. Ist der Abstand jedoch größer, dann liegt der Mittelpunkt außerhalb und es kann keine Aussage bezüglich einer Überschneidung getroffen werden.

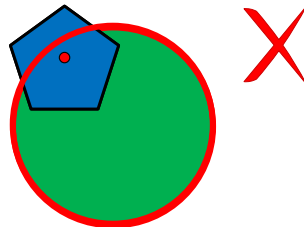


Abb. 25: Zweite Methode zum Prüfen auf Überschneidung mit dem Hindernis

In diesem Fällen muss die genaueste und aufwändigste Methode zu Prüfung herangezogen werden (vgl. Abb. 26). Diese beruht auf dem Trennungssatz [39], der Aussagen über die Trennung konvexer Mengen in euklidischen Räumen trifft. Für zwei konvexe Polygone in einem zweidimensionalen Raum ist der Nachweis der Trennung dabei einfach zu führen. Die Polygone werden entlang der Normale einer Kante eines Polygons projiziert. Überschneiden sich die sich ergebenden Intervalle nicht, so haben auch die Polygone keine Überschneidung. Im Falle einer Überschneidung muss die Prüfung für die nächste Kante fortgesetzt werden. Lässt sich für alle Kanten beider Polygone keine disjunkte Projektion finden, dann überschneiden sich die Polygone.

Diese Prüfung wird auf die Aufenthaltsräume des Fahrzeugs und das Hindernis angewandt. Zonotope sind bereits konvexe Polygone und müssen deshalb nicht umgerechnet werden. Das Hindernis in Form der Superellipse, ebenfalls eine konvexe Menge, wird durch Berechnung einer Vielzahl von Randpunkten in ein Polygon verwandelt. Der Fehler zwischen der Repräsentation des Hindernisses als Superellipse und als Polygon ist dabei bei Verwendung einer genügenden Anzahl von Randpunkten sehr klein und bereits bei leichter Überapproximation des Hindernisses durch die Superellipse gedeckt. Für die beiden Polygone kann die Prüfung nach dem Trennungssatz nach dem zuvor

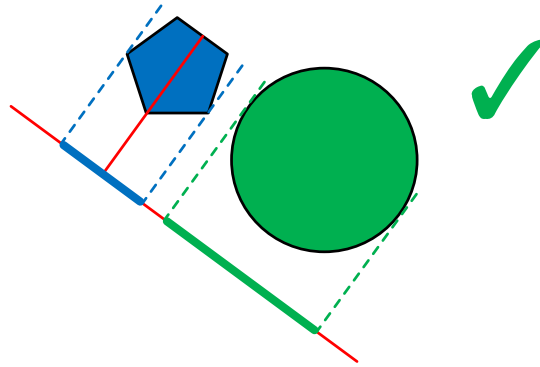


Abb. 26: Dritte Methode zum Prüfen auf Überschneidung mit dem Hindernis

beschrieben Ablauf durchgeführt werden. Damit wird die Überschneidung von Aufenthaltsraum des Fahrzeugs und Hindernis in jedem Fall entweder bestätigt und widerlegt.

5.4.3 Umsetzung in Matlab

Die programmiertechnische Umsetzung in Matlab zur Überprüfung, ob entlang der Trajektorie die maximalen Radkräfte im Modell eingehalten werden, ist in der Methode *check_wheelforces* umgesetzt.

$$[has_overun] = check_wheelforces(trace_raw)$$

Dabei werden für jeden berechneten Punkt entlang der Trajektorie *trace_raw* die zugehörigen Radkräfte bestimmt und mit dem zulässigen Maximum verglichen. Das Ergebnis jeder einzelnen Prüfung wird im Vektor *has_overun* ausgegeben.

Zur Vorbereitung der Überprüfung der Überschneidung von Erreichbarkeitsmengen müssen die Aufenthaltsräume des Gesamtfahrzeugs bestimmt werden. Dies wurde in der Methode *calculate_reachables_vehicle* realisiert.

$$[X_ns] = calculate_reachables_vehicle(X_ns_center)$$

Die Funktion rechnet dabei ausgehend von Cell-Array *X_ns_center*, in dem die Zonotope für den Fahrzeugzustand in Bezug auf den Berechnungspunkt zu verschiedenen Zeitpunkten entlang der Trajektorie gespeichert sind. Als Ergebnis werden die Aufenthaltsräume des Gesamtfahrzeugs zu eben jenen Zeitpunkten in Form der im Cell-Array *X_ns* gespeicherten Zonotopen ausgegeben.

Zur Berechnung wird dabei für jedes Zonotop *Z_c*, das die Erreichbarkeitsmenge des

Berechnungspunktes beschreibt, die eingebettete Funktion *calculate_vehicle_reachSet* aufgerufen. Zusätzlich werden die Abmessungen des Fahrzeugs in x- und y-Richtung in Fahrzeugkoordinaten in Bezug auf den Berechnungspunkt in den zweielementigen Vektoren *veh_x* und *veh_y* übergeben.

$$[Z_v] = \text{calculate_vehicle_reachSet}(Z_c, \text{veh_x}, \text{veh_y})$$

Mit diesen Informationen kann die Funktion, entsprechend der in Abschnitt 5.4.2 beschriebenen Logik, die Aufenthaltsräume des Gesamtfahrzeugs *Z_v* ermitteln. Die Rechteckabschätzung wird dabei über zehn verschiedene Winkelausrichtungen getroffen, wobei davon zwei die jeweils extremsten Abweichungen von der mittleren Ausrichtung des Fahrzeugs darstellen.

Die Überprüfung der berechneten Mengen auf Überschneidung mit dem Hindernis erfolgt in der Funktion *check_obstacle*. *X_ns* ist dabei das zuvor bestimmte Cell-Array der Erreichbarkeitsmengen des Gesamtfahrzeugs in Form von Zonotopen.

$$[\text{has_intersection}] = \text{check_obstacle}(X_{ns})$$

Die übergebenen Erreichbarkeitsmengen werden in der Funktion in Form der zuvor beschriebenen dreistufigen Prüfung auf Überschneidung mit dem Hindernis kontrolliert. Das Ergebnis jeder Prüfung wird anschließend im Vektor *has_intersection* ausgegeben.

5.5 Zusammensetzung des Lösungsalgorithmus

Alle zuvor beschriebenen Einzelschritte sollen nun zum vollständigen Lösungsalgorithmus zusammengesetzt werden. Dies wurde in Matlab in der Funktion *study_driverinfluence_FAScar* umgesetzt.

$$[\text{success}, \text{time}] = \text{study_driverinfluence_FAScar}(\text{file}, \text{foresight})$$

Zu Beginn werden in der Simulation die genutzten Messdaten aus einer Exceltabelle mit dem Namen *file*, für die die Analyse durchgeführt werden soll, über die Funktion *import_measurement_data_FAScar* geladen. Anschließend wird über eine Schleife für jeden Messpunkt die folgende Berechnung zum Finden einer sicheren Trajektorie ausgeführt:

Ausgehend vom Zustand des Fahrzeugs aus den Messdaten wird mit dem angenommenen maximalen Messfehler *err* der Zustandsraum des Messpunktes in der Mitte der Hinterachse zu Beginn in Form des Zonozops X_0_center mit dem Zentrum x_0 gebildet. Außerdem wird der Zustand der Pedalnutzung zu Beginn in der Variable *pedalstatus* ermittelt. Über die Funktion $[X_1_center, Xode, Tode] = calculate_driverInfluence(x_0, err, foresight, pedalstatus)$ wird damit die in Abschnitt 5.1 beschriebene Fahrervorausschau mit der Vorausschauzeit *foresight* durchgeführt.

Anschließend kann über die Optimierung in $[trace_raw] = calculate_trajectory(X_1_center, scaling_constraint, scaling_wheelforces, trace_raw_old)$ eine mögliche sichere Trajektorie des Fahrzeugs ermittelt werden. Der entsprechende Algorithmus wird dabei wie in Abschnitt 5.2 beschrieben ausgeführt.

Wenn die Berechnung in ACADO erfolgreich war, wird die Trajektorie in angepasster Form in der Variable *trace* gespeichert. Danach kann mit der Funktion $[X_ns_center, Xode_trace, Tode_trace] = calculate_reachables_center(X_1_center, trace, err)$ die Erreichbarkeitsanalyse für den Berechnungspunkt, wie in Kap. 5.3 beschrieben, durchgeführt werden.

Über $[has_overun] = check_wheelforces(trace_raw)$ wird überprüft, dass die Radkräfte entlang der Trajektorie nicht überschritten wurden. Die Erreichbarkeitsmengen des Berechnungspunktes werden über die Funktion $[X_ns] = calculate_reachables_vehicle(X_ns_center)$ in die möglichen Aufenthaltsbereiche des Gesamtfahrzeugs umgerechnet. Das Ergebnis kann anschließend mit der Funktion $[has_intersection] = check_obstacle(X_ns)$ auf Überschneidung mit dem Hindernis überprüft werden. Die dafür genutzten Funktionen wurden in Abschnitt 5.4 beschrieben. In der Variable *trajectory_valid* wird festgehalten, ob entsprechend von *has_overun* und *has_intersection* die Randbedingungen zu keinem Zeitpunkt verletzt wurden oder ob dies der Fall war und die errechnete Trajektorie somit keine gültige Lösung ist.

Das Berechnungsergebnis kann durch Verwendung des Skripts *draw_study_driver_influence_FAScar* zudem grafisch dargestellt werden.

Wurde eine gültige Trajektorie gefunden (prüfbar über *trajectory_valid*), so kann der Einfluss des Fahrers auf die Sicherheit des Fahrzeugs als unkritisch eingestuft werden und die Rechnung geht zum nächsten Punkt in den Messdaten weiter, wobei die Skalierungsfaktoren *scaling_wheelforces* und *scaling_constraint* auf den ursprünglichen Wert 1 zurückgesetzt werden. Ansonsten wird die Berechnung ab der Suche der Trajektorie erneut ausgeführt. Kam es in der Rechnung zu einer Überschreitung der Radkräfte (prüfbar über *has_overun*), dann wird der Wert des Skalierungsfaktors *scaling_wheelforces* um 1 erhöht. Dies führt in der Rechnung zu einer Verringerung des skalierten Anteils

übertragbarer Radkräfte s (vgl. Gl. 22) um fünf Prozentpunkte pro Stufe. Dies bedeutet s hat beim ersten Durchlauf den Wert 90%, bei erstmaliger Überschreitung den Wert 85%, bei zweiter Überschreitung den Wert 80%, usw. Kam es in der vorherigen Rechnung zu einer Überschneidung der Kollision mit dem Hindernis (prüfbar über *has_intersection*), so wird der Wert des Skalierungsfaktors *scaling_constraint* um 1 erhöht. Dies führt zu einer Vergrößerung des Hindernisses in der zugehörigen Kostenfunktion, da damit die Halbachsen der Superellipse um 0.5 m pro Stufe vergrößert werden, was wiederum die Planung einer Trajektorie mit größerem Abstand zum echten Hindernis bewirkt.

Nach dem dritten erfolglosen Durchlaufen wird die gespeicherte Trajektorie gelöscht und in der Optimierung neu initialisiert um ein „Festecken“ in einem lokalen Minimum zu verhindern. Zusätzlich werden die Skalierungsfaktoren auf den ursprünglichen Wert 1 zurückgesetzt und die Rechnung so vollständig neu begonnen. Konvergiert die Optimierung in ACADO nicht oder wird die maximale Anzahl von sieben Durchläufen ohne gültiges Ergebnis überschritten, so bricht die Rechnung ab. In diesem Fall wird angenommen, dass keine gültige Trajektorie für die Zustände des Fahrzeugs nach Fahrereinfluss existiert. Im realen Fall würde dies bedeuten, dass der Fahrer das Fahrzeug in einen unsicheren Zustand bringen kann, der zu einer Kollision führt. Das Fahrzeug würde dem Fahrer deshalb die Kontrolle über das Fahrzeug entziehen und eine Bewegung entlang der letzten gültigen Trajektorie in den Stillstand ausführen.

6 Untersuchung des Absicherungskonzepts

In diesem Kapitel soll das zuvor beschriebene Absicherungskonzept untersucht werden. Dazu wird zunächst der Einfluss der verschiedenen Parameter im Fahrzeugmodell auf die Erreichbarkeitsmenge von Berechnungspunkt und Gesamtfahrzeug bestimmt. Anschließend werden die Fehlauflöseraten der Fahrzeugabsicherung gegenüber den interactIVe-Versuchsdaten ermittelt, bevor danach zwei Anpassungen des Interaktionsmechanismus diskutiert werden.

6.1 Einfluss der Fahrermodellparameter auf die Erreichbarkeitsmenge

Das Fahrermodell bestimmt die Gestalt der Erreichbarkeitsmenge des Fahrzeugs nach Fahrervorausschau. In diesem Abschnitt soll deshalb die Größe des Einflusses der verschiedenen Parameter im Modell untersucht werden. Dabei werden (ausgehend von einem unsicheren Anfangszustand) die Erreichbarkeitsmengen jeweils nach 50, 100, 200 und 300 Millisekunden bestimmt. Die Wahl dieser Zeitbereiche spiegelt etwa die Dauer wieder, innerhalb denen ein Notfallsystem in der Realität Hinderniserkennung und Entscheidungsfindung durchführen kann und muss (vgl. automatische Notbremse [54]). Eine längere Vorausschauzeit ist nicht sinnvoll, da ansonsten die Erreichbarkeitsmengen sehr groß werden und vom Modell nicht mehr beherrscht werden können. Die Auswertung erfolgt ausgehend von einem Fahrzeug, das sich im Koordinatenursprung befindet und sich mit einer konstanten Geschwindigkeit von 50 km/h bzw. 100 km/h gerade in x-Richtung bewegt (der einfachen sowie doppelten Geschwindigkeit, bei der die Realversuche in interactIVe durchgeführt wurden, vgl. Kap. 3.2). Für die Auswertung wird davon ausgegangen, dass der Fahrer im Ausgangszustand kein Pedal gedrückt hat. Das Loslassen des vorherigen Pedals liegt schon so weit in der Vergangenheit, so dass er sofort Gas- oder Bremspedal betätigen könnte.

Im Folgenden wird der Einfluss der menschlichen Längsführung, der menschlichen Querrführung und der kombinierten menschlichen Fahrzeugführung auf die Erreichbarkeitsmenge des Berechnungspunktes im Fahrzeugmodell (Mitte der Hinterachse) untersucht. Anschließend werden die Auswirkungen auf die Erreichbarkeitsmenge des Gesamtfahrzeugs betrachtet.

6.1.1 Einfluss der menschlichen Längsführung

Bei der Untersuchung des Einflusses der menschlichen Längsführung sollen zwei unterschiedliche Fälle betrachtet werden. Zum einen soll Längsführung durch das zuvor aufgestellte Fahrermodell analysiert werden, zum anderen soll eine (konservative) Abschätzung der Längsführung untersucht werden, bei der stets eine Beschleunigung aus dem gesamten Intervall $\pm\mu g$ wirken kann. Für die Querführung wirkt lediglich die Unsicherheit.

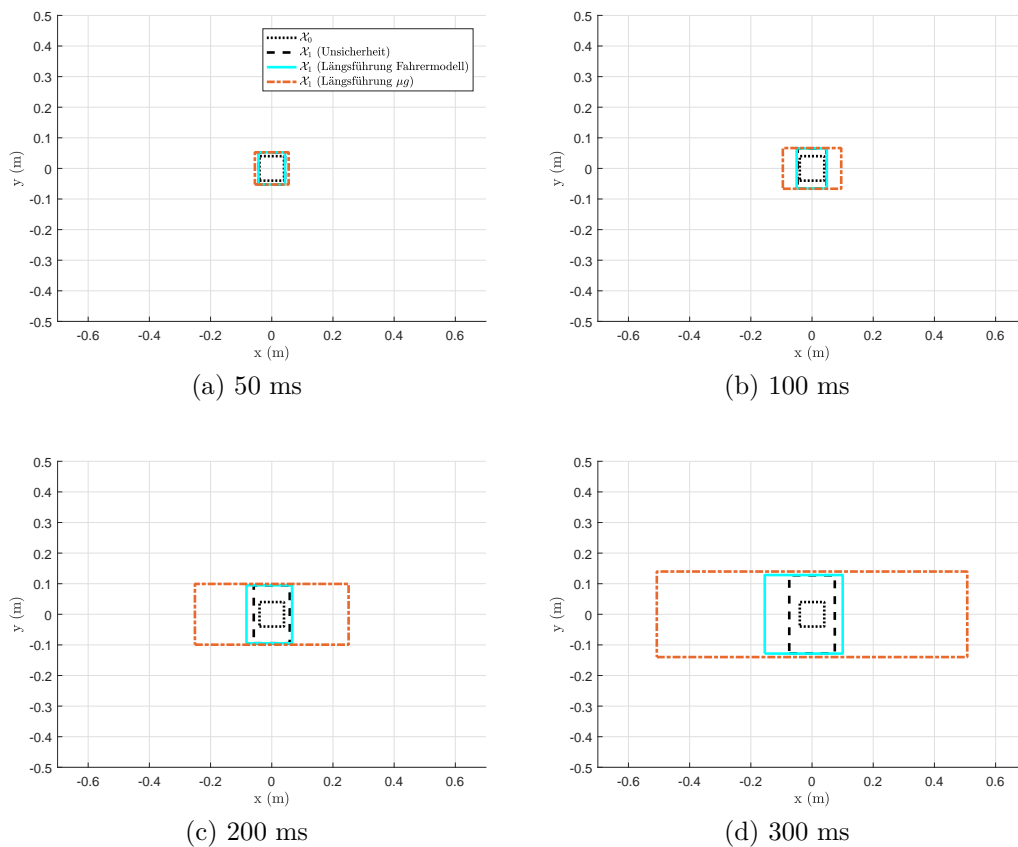


Abb. 27: Erreichbarkeitsmengen des Berechnungspunktes in der x-y-Ebene unter Längsführung bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h

Für die verschiedenen Fälle der Fahrzeuglängsführung werden, ausgehend vom unsicheren Anfangszustand \mathcal{X}_0 , mit einer Fahrervorausschau analog zu Kap. 5.1 die Erreichbarkeitsmengen für verschiedene Vorausschauzeiten bestimmt. In Abb. 27 und in Abb. 28 ist das Ergebnis für die Position des Berechnungspunktes im Fahrzeug für einen Anfangszustand dargestellt, bei dem sich das Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h bzw. 100 km/h in x-Richtung bewegt. Zum besseren Vergleich der sich ergebenden Mengen wurden diese übereinander eingezeichnet, d.h. die jeweilige Erreichbarkeitsmenge \mathcal{X}_1 wurde so in x-Richtung verschoben, dass sich der Punkt, zu dem sich das Fahrzeug ohne äußeren Einfluss bewegt hätte, wieder im Ursprung liegt. Zusätzlich wurde noch die

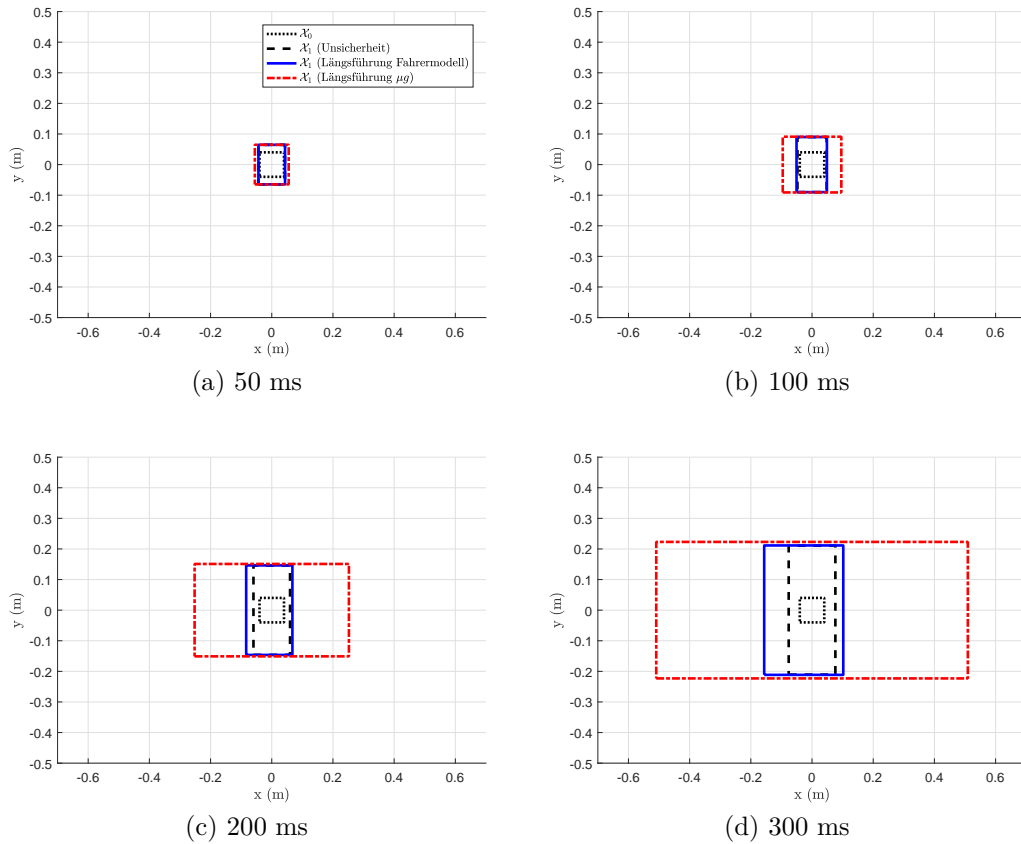


Abb. 28: Erreichbarkeitsmengen des Berechnungspunktes in der x-y-Ebene unter Längsführung bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h

Erreichbarkeitsmenge eingezeichnet, die den vergrößerten Aufenthaltsbereich des Fahrzeugs nach der jeweiligen Vorausschauzeit auf Grund der Fortbewegung vom unsicheren Ausgangszustand aus und den Unsicherheiten der Steuerung angibt.

Aus den Abbildungen wird ersichtlich, dass sich die Erreichbarkeitsmenge bei kleinen Vorausschauzeiten (vgl. Darstellungen zu 50 ms und 100 ms) nur wenig gegenüber der Ausgangsmenge \mathcal{X}_0 verändert.

Erwartungsgemäß ist keine Abhängigkeit der Größe der Erreichbarkeitsmengen in x-Richtung von der Geschwindigkeit ersichtlich. Lediglich in y-Richtung zeigt sich bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h eine Vergrößerung der Erreichbarkeitsmengen. Dies kann jedoch auf das Zusammenspiel der Unsicherheit im Gierwinkel und in der Gierwinkelgeschwindigkeit mit der Bewegungsgeschwindigkeit des Fahrzeugs erklärt werden.

Es kann außerdem beobachtet werden, dass die Erreichbarkeitsmenge für die Längsführung aus dem Fahrermodell mit steigender Vorausschauzeit stärker in negative als in positive x-Richtung wächst. Hier zeigt sich der stärkere Einfluss des Fahrers auf eine Verringerung der Fahrzeugbeschleunigung durch Drücken des Bremspedals. In positive Richtung sind ihm nur deutlich geringere Änderungsraten möglich (vgl. Tab. 4).

6.1.2 Einfluss der menschlichen Querführung

Zur Untersuchung des Einflusses der menschlichen Querführung wird - analog zur vorherigen Untersuchung - wieder die Erreichbarkeitsmenge des Berechnungspunktes im Fahrzeugmodell bestimmt, wobei die Querführung, d.h. der Lenkwinkel, entsprechend dem Fahrermodell beeinflusst wird und für die Längsführung, d.h. auf die Fahrzeugbeschleunigung, lediglich die Unsicherheit wirkt.

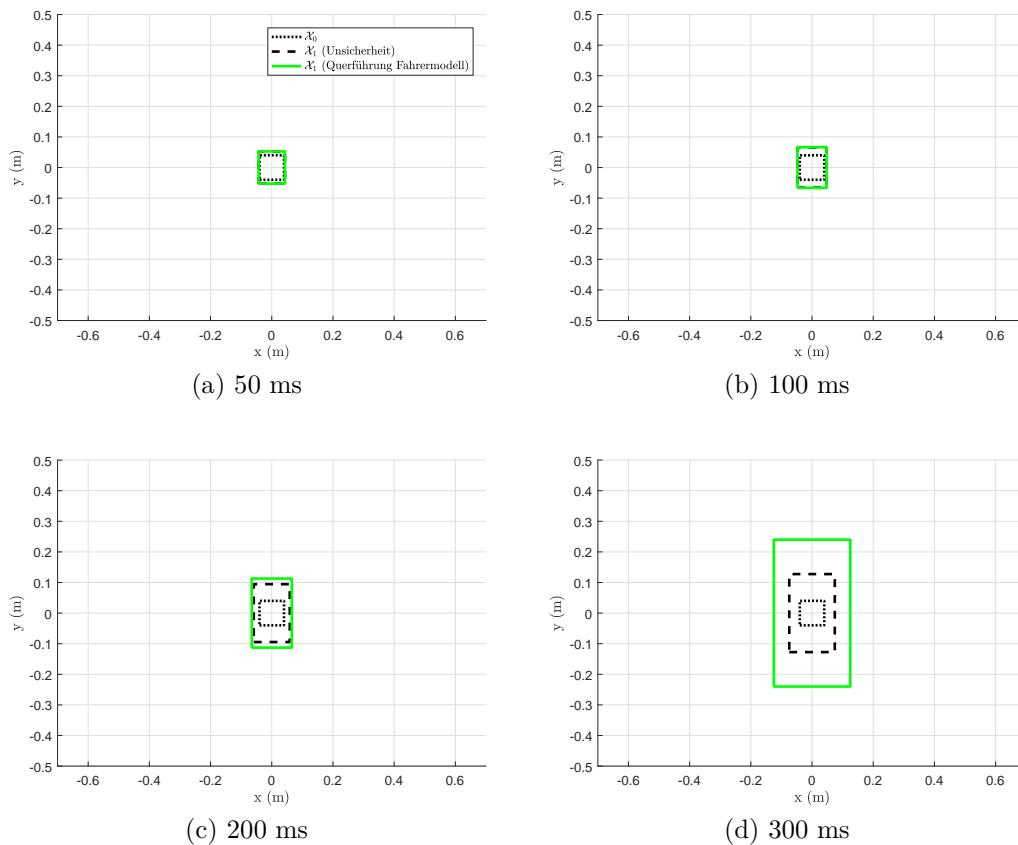


Abb. 29: Erreichbarkeitsmengen des Berechnungspunktes in der x-y-Ebene unter Querführung bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h

In Abb. 29 und in Abb. 30 sind die Ergebnisse der Untersuchung in der x-y-Ebene für ein mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h bzw. 100 km/h geradlinig in x-Richtung fahrendes Fahrzeug dargestellt. Um die Größe des Einflusses beurteilen zu können, wurden die unsichere Ausgangsmenge \mathcal{X}_0 und die Erreichbarkeitsmenge nur unter Einfluss der Unsicherheiten ebenfalls dargestellt. Die Erreichbarkeitsmengen sind wieder übereinander eingezeichnet.

In den Abbildungen zeigt sich ein kleiner Einfluss der menschlichen Querführung auf die Erreichbarkeitsmenge des Berechnungspunktes in der x-y-Ebene für kleine und mittlere Vorausschauzeiten (vgl. Darstellungen zu 50 ms, 100 ms und 200 ms). Der Einfluss

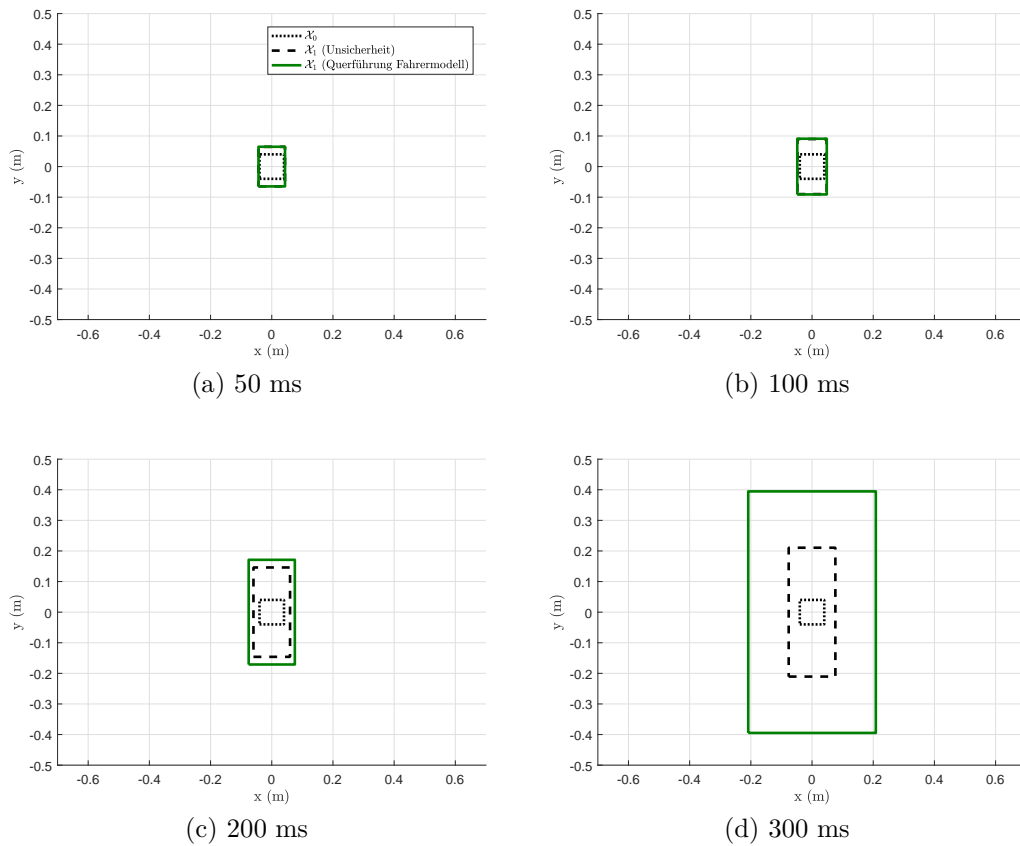


Abb. 30: Erreichbarkeitsmengen des Berechnungspunktes in der x-y-Ebene unter Querführung bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h

ist dabei bei höheren Geschwindigkeiten stärker ausgeprägt. Dies liegt darin begründet, dass die Querführung, d.h. eine Änderung des Lenkwinkels im Fahrzeugmodell, vor allem zu einer Änderung des Gierwinkels führt. Erst nach einiger Zeit resultiert aus der veränderten Bewegungsrichtung eine sichtliche Änderung des Aufenthaltsbereiches des Berechnungspunktes, wobei diese umso stärker ist, je schneller sich das Fahrzeug bewegt.

6.1.3 Einfluss der kombinierten menschlichen Fahrzeugführung

Nachdem zuvor der Einfluss von Längs- bzw. Querführung einzeln dargestellt wurde, soll nun der Einfluss der kombinierten menschlichen Fahrzeugführung untersucht werden. Dazu wird - wie bei den beiden vorherigen Untersuchungen - die Erreichbarkeitsmenge des Berechnungspunktes bestimmt. Es werden die beiden Fälle Fahrzeugführung entsprechend dem Fahrermodell und Fahrzeugführung mit Beschleunigung aus dem Intervall $\pm \mu g$ zur Längsführung und mit Querführung nach dem Fahrermodell näher betrachtet.

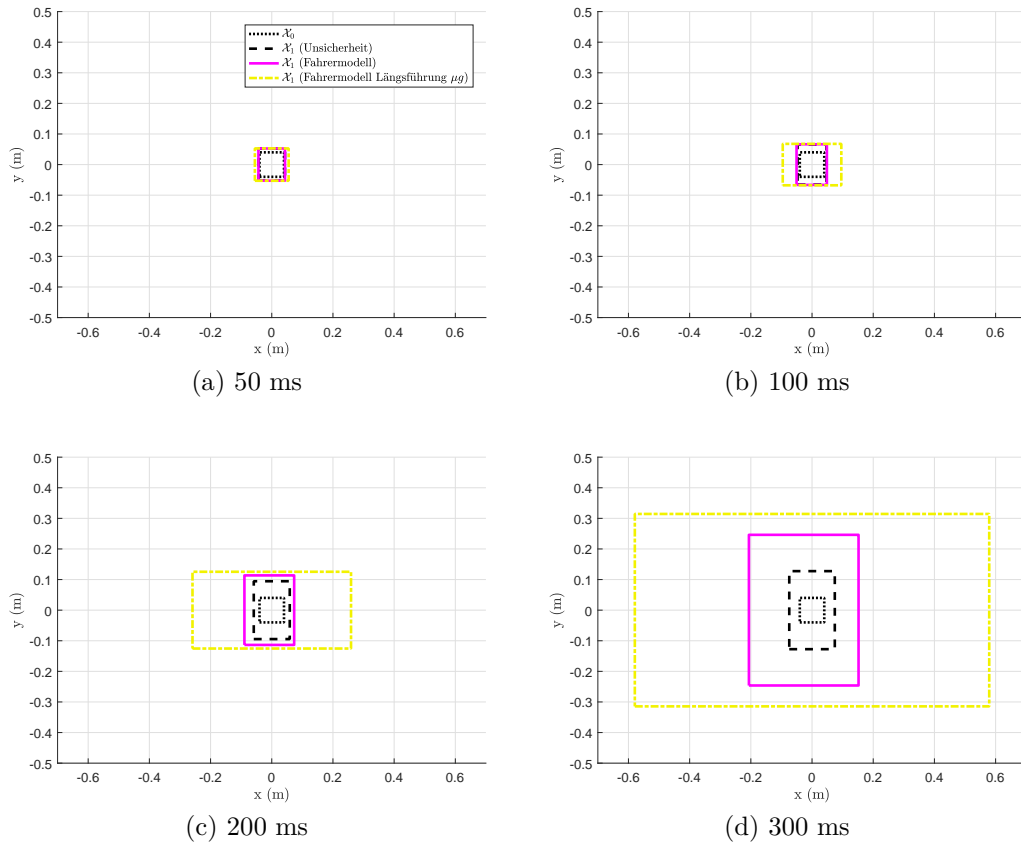


Abb. 31: Erreichbarkeitsmengen des Berechnungspunktes in der x-y-Ebene unter menschlicher Fahrzeugführung bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h

In Abb. 31 und in Abb. 32 sind wieder die Ergebnisse der Untersuchung in der x-y-Ebene für ein mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h bzw. 100 km/h geradlinig in x-Richtung fahrendes Fahrzeug dargestellt. Wie bei den vorherigen Untersuchungen sind, um die Größe des Einflusses beurteilen zu können, die unsichere Ausgangsmenge \mathcal{X}_0 und die Erreichbarkeitsmenge nur unter Einfluss der Unsicherheiten ebenfalls dargestellt. Die Erreichbarkeitsmengen sind wieder übereinander eingezeichnet.

In den Abbildungen bestätigt sich, dass der Fahrer bei kleinen Vorausschauten (vgl. Darstellung zu 50 ms und 100 ms) nur geringen Einfluss auf die Größe der Erreichbarkeitsmenge hat. Bei längerer Einflussnahme des Fahrers weitet sich die Menge in x-Richtung auf, wobei eine Beeinflussung der Beschleunigung im Intervall $\pm\mu g$ zu einer deutlich stärkeren Vergrößerung führt als dies nach dem Fahrermodell möglich ist. In y-Richtung zeigt sich die schon zuvor diskutiert geschwindigkeitsabhängige Vergrößerung auf Grund der menschlichen Querführung.

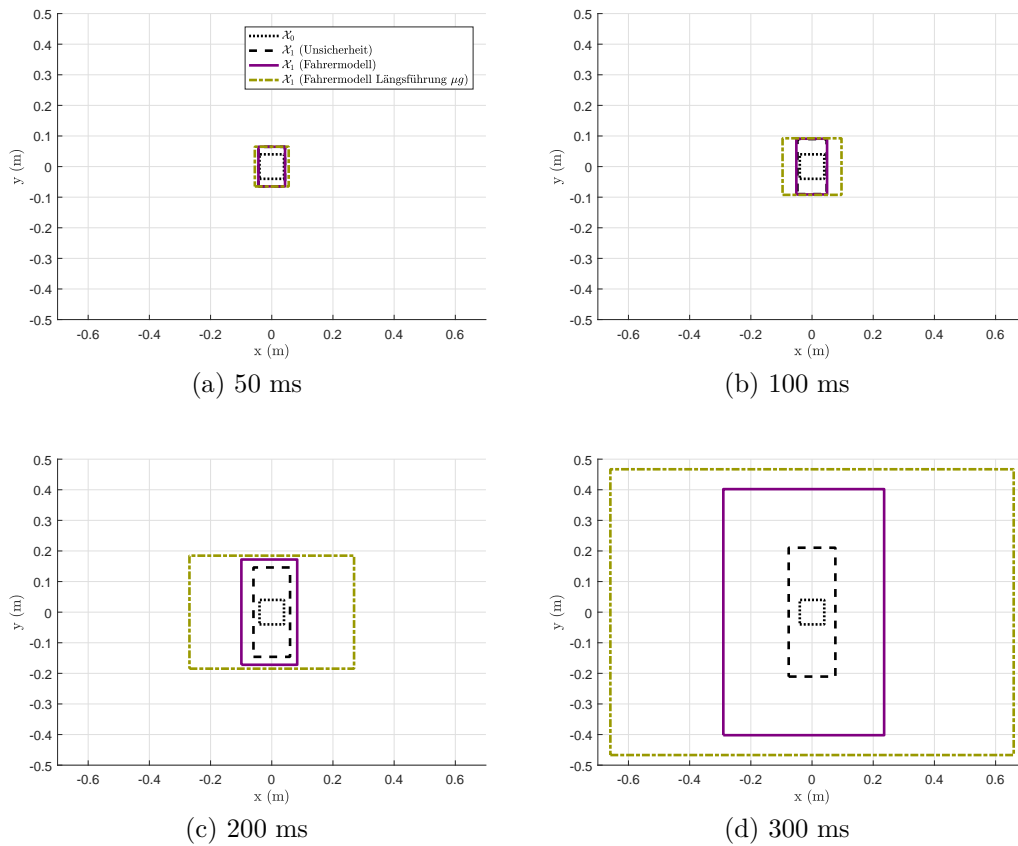


Abb. 32: Erreichbarkeitsmengen des Berechnungspunktes in der x-y-Ebene unter menschlicher Fahrzeugführung bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h

6.1.4 Vergleich des Einflusses der verschiedenen Parameter auf die Erreichbarkeitsmenge des Gesamtfahrzeuges

In den bisherigen Untersuchungen wurde nur der Einfluss der menschlichen Fahrzeugsteuerung auf die Erreichbarkeitsmenge des Berechnungspunktes im Fahrzeugmodell bestimmt. Da jedoch im Bereich der Querführung eine Beeinflussung des Fahrzeuggierwinkels erwartet werden kann, sollen nun auch die Auswirkungen auf die Erreichbarkeitsmenge des Gesamtfahrzeuges betrachtet werden.

In Abb. 33 und in Abb. 34 sind die Erreichbarkeitsmengen der zuvor beschriebenen Interaktionsmechanismen in der x-y-Ebene wieder für ein mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h bzw. 100 km/h geradlinig in x-Richtung fahrendes Fahrzeug dargestellt. Wie zuvor wurden die Erreichbarkeitsmengen übereinander eingezeichnet.

Bei der Betrachtung des Gesamtfahrzeuges kann der geringe Einfluss des Fahrers bei kleinen Vorausschauzeiten bestätigt werden (vgl. Darstellung zu 50 ms und 100 ms). Bei längeren Vorausschauzeiten ist zudem ein nun erheblicher Einfluss der Querführung auf

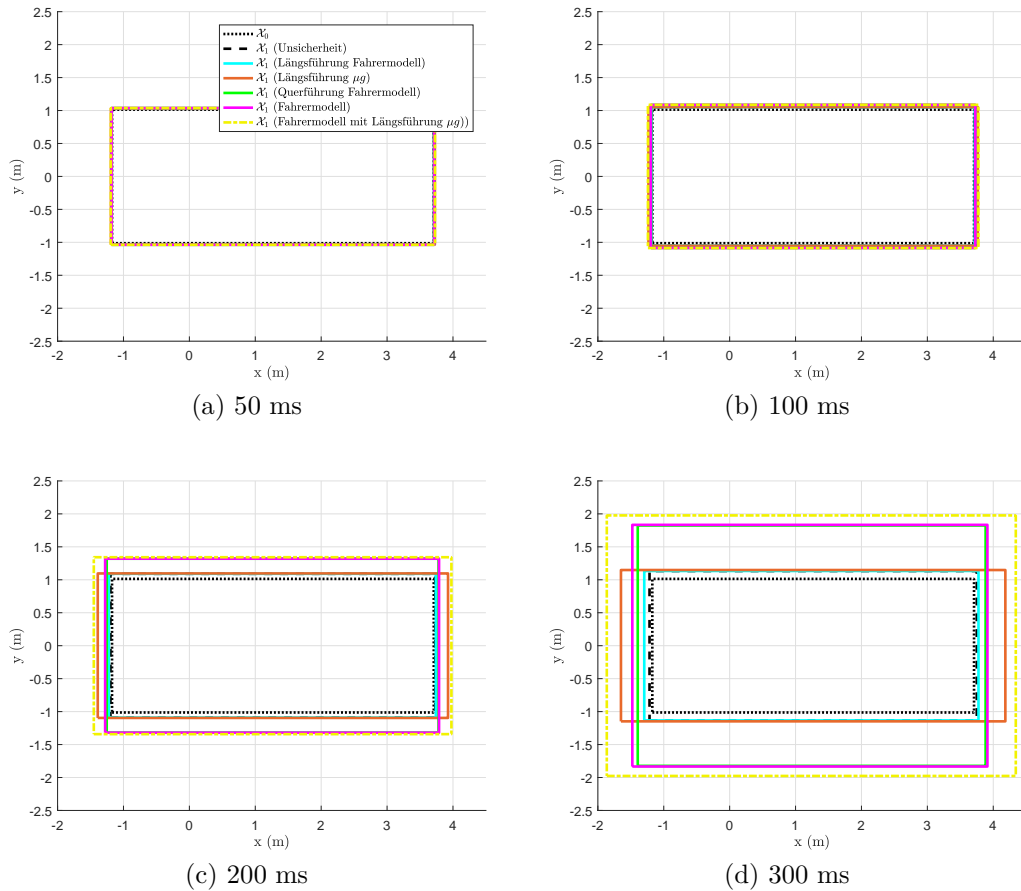


Abb. 33: Erreichbarkeitsmengen des Gesamtfahrzeugs in der x-y-Ebene bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h

die Erreichbarkeitsmenge sichtbar, der die Längsführung nach Fahrermodell dominiert. Die Erreichbarkeitsmenge nach reiner Längsführung nach dem Fahrermodell unterscheidet sich in Gesamtfahrzeugbetrachtung kaum von der Beeinflussung des Fahrzeugs rein durch Unsicherheiten und ist somit deutlich weniger konservativ als Längsführung aus dem Intervall $\pm\mu g$. Wie erwartet führt eine höhere Geschwindigkeit auch für das Gesamtfahrzeug zu einem stärkeren Einfluss der Querführung, d.h. die Erreichbarkeitsmenge hat eine größere Ausdehnung in y-Richtung.

6.2 Bestimmung der Fehlauflöserate

In diesem Abschnitt soll der Grad der Konservativität des erstellten Algorithmus und damit die Einschränkung des Fahrers in seinem gewohnten Verhalten quantifiziert werden. Dazu wird bezogen auf die bestehenden Daten aus dem Realversuch im Projekt interactIVe die Fehlauflöserate für unterschiedliche Längen des Fahrer-Prädiktionsintervalls ermittelt.

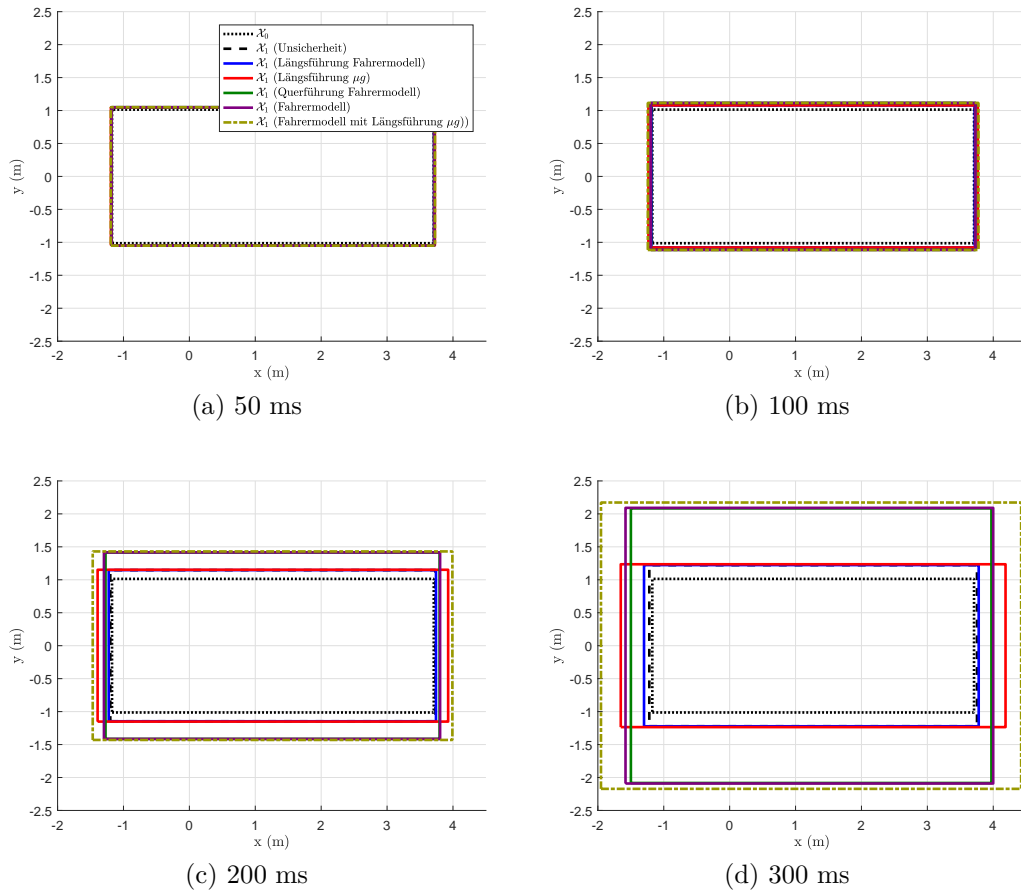


Abb. 34: Erreichbarkeitsmengen des Gesamtfahrzeugs in der x-y-Ebene bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h

Die Untersuchung kann dabei als Hypothesentest aufgefasst werden. Dabei wird die Aktion der Sicherheitsfunktion (Algorithmus löst aus oder nicht) gegen das in den Daten hinterlegte Ergebnis im Versuch (Kollision mit dem Hindernis oder nicht) geprüft. Bei einer solchen binären Klassifikation lässt sich das Verhalten in der Untersuchung durch Kombination aller Möglichkeiten in vier Kategorien einteilen. Diese sind in Form einer Wahrheitstabelle in Tab. 7 dargestellt. [6]

Tab. 7: Wahrheitstabelle in der Untersuchung

	Kollision im Versuch	keine Kollision im Versuch
Algorithmus löst aus	richtig positiv	falsch positiv
Algorithmus löst nicht aus	falsch negativ	richtig negativ

Der Algorithmus funktioniert dabei gut, wenn möglichst viele Situationen richtig erkannt werden, d.h. die Sicherheitsfunktion löst in der Simulation aus, wenn es im Versuch eine Kollision gab (richtig positiv), und übersteuert den Fahrer nicht, wenn es keine Kollision gab (richtig negativ). Situationen, in denen die Sicherheitsfunktion irrtümlich auslöst

(falsch positiv) oder in denen sie nicht eingreift, obwohl dies notwendig gewesen wäre (falsch negativ), sollten möglichst wenig auftreten.

Die Anzahl von Fällen, in denen das System irrtümlich auslöst, im Verhältnis zu allen Auslösungen wird als falsch-positiv-Rate bezeichnet. Die falsch-negativ-Rate ist äquivalent für eine Nichtauslösung des Systems definiert. Bei formal abgesicherten Funktionen wird grundsätzlich eine sehr geringe falsch-negativ-Rate erwartet, da die verwendete Methodik ja gerade darauf abzielt alle kritischen Situationen zu erkennen. Ein Wert größer Null deutet auf falsche Annahmen oder Fehler im verwendeten Modell hin. Im Gegensatz dazu wird eine erhöhte falsch-positiv-Rate erwartet, da durch die konservativen Annahmen im Sicherheitsnachweis auch Situationen als kritisch bewertet werden, bei denen es nicht zur Kollision kam.

6.2.1 Vorgehensweise

Zur Auswertung wird aus den Messdaten der jeweils relevante Teil extrahiert. Dieser beginnt, sobald sich der Messpunkt im Fahrzeug (Mitte der Hinterachse) 22.20 m vor dem Hindernis befindet (also gerade die Lichtschranke passiert hat; vgl. Abb. 50 in Anhang A), und endet 5 m nach dem Hindernis, da das Fahrzeug dieses dann vollständig passiert hat. Da sich das Fahrzeug auf einer Straße in östliche Richtung bewegt, können die aufgezeichneten GPS-Koordinaten als Ortsangaben im globalen Koordinatensystem verwendet werden (die Straße verläuft entlang der x-Achse, die y-Achse zeigt in Fahrtrichtung nach Norden und damit aus Sicht des Fahrers nach links). Der Ursprung wird in die Mitte der Spur auf Höhe des Hindernisses gelegt.

Für das Hindernis (im Versuch ein Netz) wird eine Breite von 1.35 m entsprechend dem Versuchsaufbau angenommen. Um Kollisionen zwischen Hindernis und Erreichbarkeitsmengen sicher detektieren zu können, wird die Dicke des Hindernisses zu 0.2 m gesetzt. Die Hälfte der jeweiligen Werte bestimmen damit die Länge der Halbachsen der Superellipse in der Simulation. Über die Breite der Spur von 3.20 m und der Breite des Hindernisses ergibt sich die y-Position des Ellipsenzentrums damit zu -0.925 m. In x-Richtung liegt das Zentrum auf Höhe des Ursprungs. Das Hindernis ist nicht gegenüber dem globalen Koordinatensystem rotiert.

Es wird von guten Reibeigenschaften zwischen Straße und Fahrzeugrädern ausgegangen. Der Wert des Reibungskoeffizienten μ wird deshalb auf den Wert 1 gesetzt. Für den Ortsfaktor g wird 9.81 m/s^2 verwendet.

In der Simulation wird der Ausgangszustand x_0 in jedem Schritt über die jeweiligen Messwerte gesetzt. Da sich der GPS-Sensor im Versuch in der Mitte der Hinterachse befand, können die Messwerte ohne Umrechnung als Positions- und Geschwindigkeitswerte für den Berechnungspunkt im Fahrzeugmodell genutzt werden. Wurde für den aktuellen Messpunkt die Sicherheit im Algorithmus nachgewiesen, geht die Prüfung in einer Schleife zum nächsten Messpunkt weiter. Dies wird so lange fortgesetzt, bis das Ende der extrahierten Messpunkte erreicht ist (und das Fahrzeug das Hindernis damit sicher passiert hat) oder der Sicherheitsalgorithmus auslöst. Abbrüche auf Grund von Fehlern in den Paketen ACADO und CORA sollen dabei wie eine Auslösung des Systems behandelt werden, da im realen Fall das Fahrzeug in einen sicheren Zustand überführt werden müsste, da die Sicherheit für die Handlungsoptionen des Fahrers nicht nachgewiesen werden kann.

Um genügend Daten zur Verfügung zu haben, die sowohl Fälle mit als auch ohne Kollision beinhalten, wurde sich bei den zur Verfügung stehenden Daten des Realversuchs nicht nur auf die *Kontrollgruppe* beschränkt, sondern alle Testszenarien verwendet. Ein Eingriff der Lenkassistentz wird so behandelt, als hätte der menschliche Fahrer diese Steuerungseingabe getätigt. Insgesamt stehen somit Daten von 45 Versuchen mit Kollisionsszenario zur Verfügung.

6.2.2 Gegenüberstellung verschiedener Vorausschauzeiten

In der Untersuchung wurde die Sicherheitsüberprüfung im Algorithmus für Fahrer-Prädiktionsintervalle der Länge 100 ms und 200 ms durchgeführt. Auf die Untersuchung von Intervallen der Länge 50 ms wurde verzichtet, da, wie in Kap. 6.1 gezeigt, der Fahrereinfluss dort nur sehr klein ist. Zeitintervalle der Länge 300 ms führen zu sehr großen Erreichbarkeitsmengen nach Fahrervorausschau, so dass bei der Analyse der Erreichbarkeitsmengen entlang der Trajektorie in CORA diese oft nicht mehr berechnet werden können und die Simulation deshalb oft schon im ersten Messpunkt abbricht. Eine Auswertung ist damit also nicht sinnvoll möglich.

Im Folgenden soll zunächst der Simulationsablauf für einen beliebig herausgegriffenen Datensatz (VP44 aus der Testgruppe *Assistiert mit stets eingekoppeltem Fahrer*) für die beiden untersuchten Vorausschauzeiten vorgestellt werden. Zu jedem Plot ist zudem die Zeit im Versuch t_{dp} angegeben, die für den jeweiligen p-ten Datenpunkt seit dem ersten untersuchten Datenpunkt vergangen ist. Eine Darstellung der Erreichbarkeitsmengen mit Hindernis ist in Anhang C für alle untersuchten Messpunkte dieses Beispiels aufgeführt.

Für ein Fahrer-Prädiktionsintervall der Länge 100 ms ergibt sich in der Simulation beispielsweise der folgende Verlauf:

Trotz Initialisierung mit einer Trajektorie mit leichtem Lenken nach links wird in der Optimierung im ersten Schritt die ideale Lösung für maximale Verzögerung bei Gerausfahrt gefunden (Lenken würde eine Verlängerung der Manöverzeit auf Grund der Beschränkung der Radkräfte bedeuten).

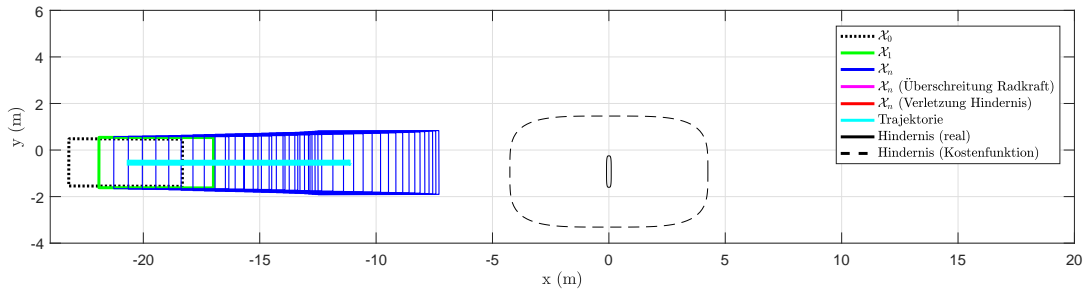


Abb. 35: Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie zum Datenpunkt bei $t_{d1} = 0.00$ s aus dem Versuch von VP44 für 100 ms Vorausschauzeit

Ein Ausweichen ist bis 0.55 Sekunden nach dem ersten Datenpunkt nicht erforderlich, da eine Vollbremsung ausreicht, um nicht mit dem Hindernis zu kollidieren.

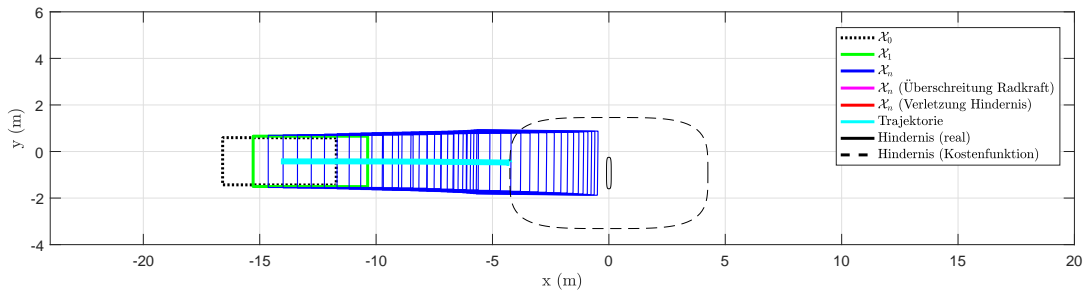


Abb. 36: Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie zum Datenpunkt bei $t_{d12} = 0.55$ s aus dem Versuch von VP44 für 100 ms Vorausschauzeit

Für den folgenden Datenpunkt lässt sich zunächst auch durch eine Vergrößerung des Hindernisses in der Kostenfunktion keine gültige Lösung finden.

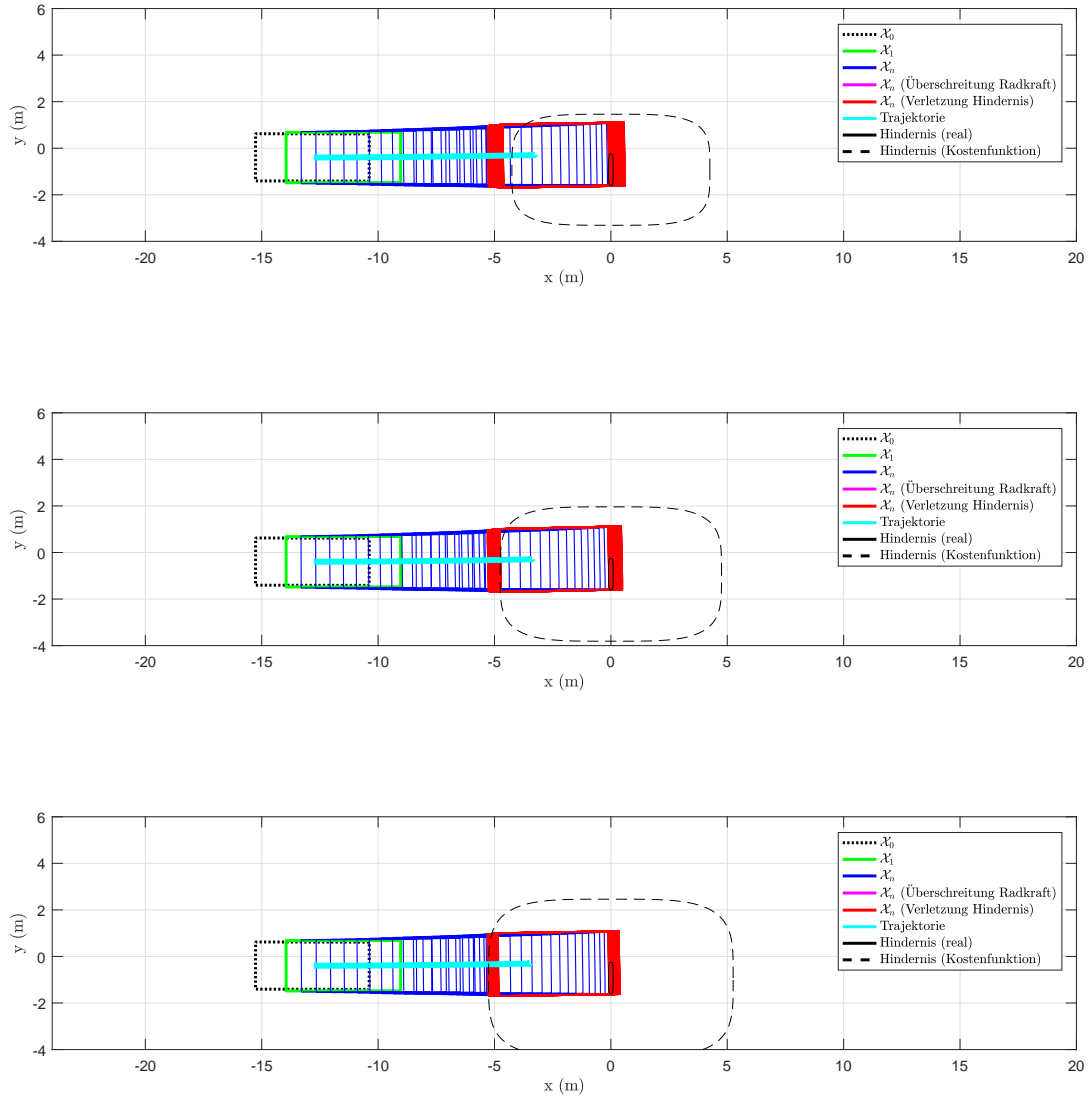


Abb. 37: Erreichbarkeitsmengen und (ungültige) Trajektorien zum Datenpunkt bei $t_{d13} = 0.60$ s aus dem Versuch von VP44 für 100 ms Vorausschauzeit

Durch Neuinitialisierung mit einer Trajektorie mit leichtem Lenken nach links kann ein „Feststecken“ vor dem Hindernis verhindert werden. Mit der neuen Basislösung kann eine gültige Trajektorie gefunden werden.

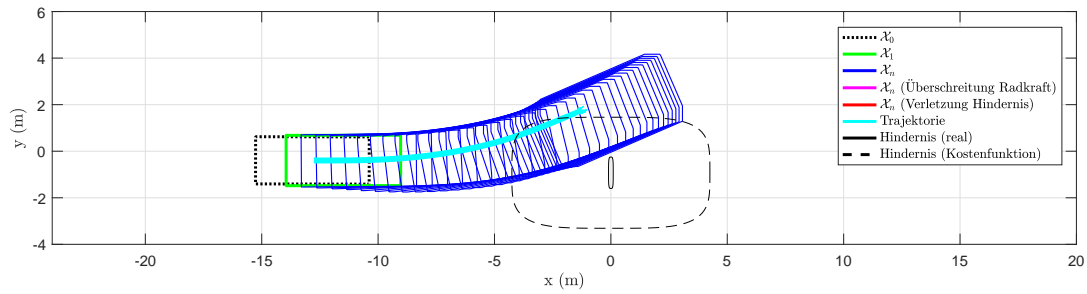


Abb. 38: Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie zum Datenpunkt bei $t_{d13} = 0.60$ s aus dem Versuch von VP44 für 100 ms Vorausschauzeit

Bei weiterer Annäherung an das Hindernis wird zunächst noch eine Trajektorie gefunden, die sich jedoch mit dem Hindernis überschneidet.

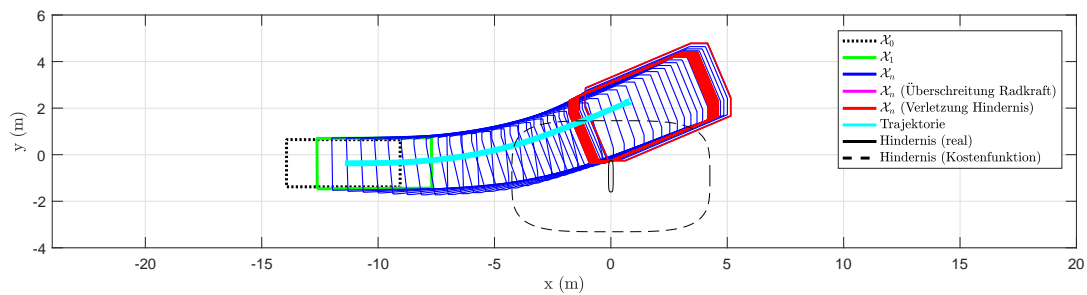


Abb. 39: Erreichbarkeitsmengen und (ungültige) Trajektorie zum Datenpunkt bei $t_{d15} = 0.70$ s aus dem Versuch von VP44 für 100 ms Vorausschauzeit

Bei der Berechnung der Erreichbarkeitsmengen entlang einer Trajektorie, die weiter am Hindernis vorbeiführt, bricht die Rechnung ab. In CORA wurde die maximale Rekursionstiefe (500) für die Aufteilung der Mengen bei der Berechnung erreicht. An dieser Stelle würde im Betrieb die Sicherheitsfunktion auslösen und ein Sicherheitsmanöver entlang der Lösung des vorherigen Zeitschritts ausführen. Dieses Verhalten kann für das gezeigte Beispiel als richtig angenommen werden, da es im Versuch im späteren Zeitverlauf zur Kollision kam.

Auf einem Rechner mit einem Intel i5-3570K Prozessor (4 mal 3.4 GHz), 8 GB Arbeitsspeicher und Windows 10 als Betriebssystem braucht der Algorithmus mit einem Fahrer-Prädiktionsintervall der Länge 100 ms zur Auswertung der 15 Datenpunkte bis zum Abbruch 8822.1 Sekunden (etwa 2.45 Stunden). Die insgesamt 19 Berechnungen (eine pro Datenpunkt, außer bei t_{d13} , bei dem vier Iterationen benötigt wurden, sowie die erfolglose Berechnung am Ende) dauerten damit durchschnittlich etwa 7.74 Minuten,

womit der Algorithmus deutlich zu langsam ist, als das es möglich ist, ihn in Echtzeitanwendungen einzusetzen. Für die Erreichbarkeitsanalyse entlang der Trajektorie entfiel mit 66.9% der Großteil der Rechenzeit. Die Optimierung der Trajektorie und die Fahrerprädiktion konnten in 30.7% bzw. 0.6% der Gesamtberechnungsdauer abgeschlossen werden.

Für ein Fahrer-Prädiktionsintervall der Länge 200 ms können in der Simulation für den gleichen Datensatz folgende Unterschiede festgestellt werden:

Im ersten Schritt wird wieder eine gerade Trajektorie mit maximaler Verzögerung als beste Lösung gefunden. Im Vergleich zur nur halb so langen Fahrervorausschau sind die Erreichbarkeitsmengen entlang der Trajektorie deutlich sichtbar vergrößert.

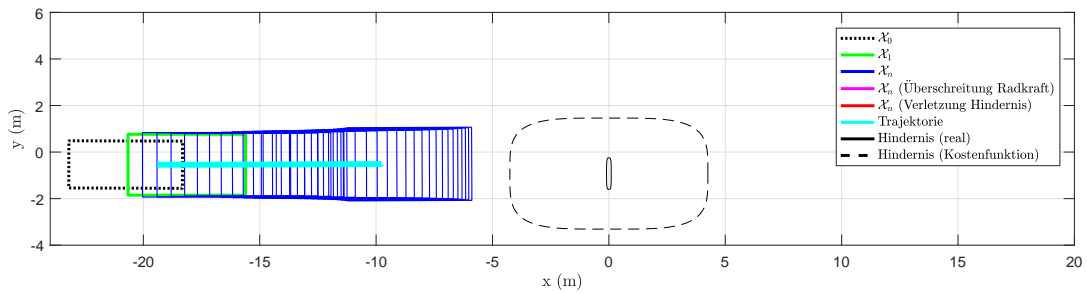


Abb. 40: Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie zum Datenpunkt bei $t_{d1} = 0.00$ s aus dem Versuch von VP44 für 200 ms Vorausschauzeit

Auf Grund der längeren Einflusszeit des Fahrers wird schon 0.45 Sekunden nach dem ersten Datenpunkt der Zeitpunkt erreicht, bei dem das System durch Vollbremsung das Fahrzeug gerade noch vor dem Hindernis zu stehen bringen könnte.

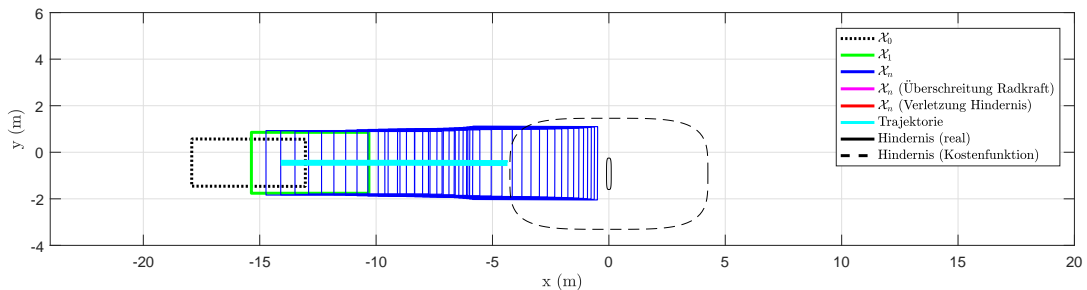


Abb. 41: Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie zum Datenpunkt bei $t_{d10} = 0.45$ s aus dem Versuch von VP44 für 200 ms Vorausschauzeit

Anschließend gelingt es dem Algorithmus nicht, die bestehende Trajektorie bei Verwendung eines immer größeren Hindernisses in der Kostenfunktion so zu verbessern, dass

dem Hindernis stattdessen ausgewichen wird.

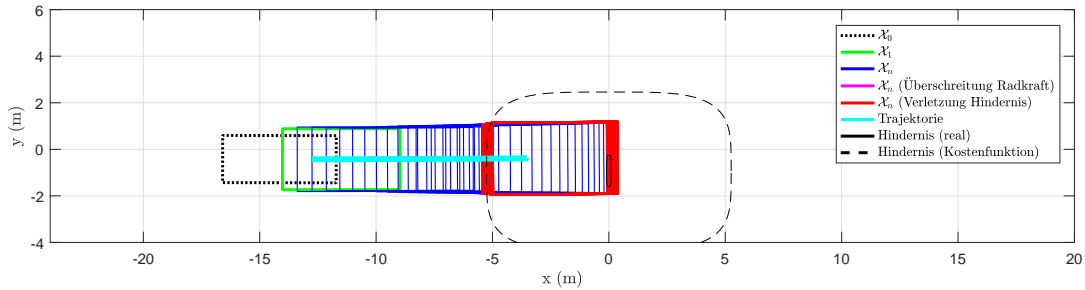


Abb. 42: Erreichbarkeitsmengen und (ungültige) Trajektorie zum Datenpunkt bei $t_{d11} = 0.50$ s aus dem Versuch von VP44 für 200 ms Vorausschauzeit

Nach Neuinitialisierung mit einer Trajektorie mit leichtem Lenken nach links, bricht der Algorithmus bei der Berechnung der Erreichbarkeitsmengen in CORA ab, da dort wieder die maximale Rekursionstiefe erreicht wurde. Bei längerer Vorausschau würde dem Fahrer in Realität demnach bereits 0.2 Sekunden früher die Kontrolle entzogen und das Fahrzeug sicher zum Stillstand gebracht.

Auf dem zuvor genutzten Rechner braucht der Algorithmus mit einem Fahrer-Prädiktionsintervall der Länge 200 ms zur Auswertung der 11 Datenpunkte bis zum Abbruch 5499.2 Sekunden (etwa 1.53 Stunden). Die insgesamt 14 Berechnungen (eine pro Datenpunkt, außer bei t_{d11} , bei dem vier Iterationen inkl. der erfolglosen Berechnung am Ende benötigt wurden) dauerten damit durchschnittlich etwa 6.55 Minuten, womit auch in diesem Fall keine Echtzeitfähigkeit gegeben ist. Der Anteil des benötigten Zeitaufwands zur Berechnung der einzelnen Teilschritte bleibt im Vergleich zur kürzeren Vorausschauzeit nahezu gleich. Für die Erreichbarkeitsanalyse entfiel mit 72.4% wieder der Großteil der Rechenzeit. Die Optimierung der Trajektorie und die Fahrerprädiktion konnten in 24.1% bzw. 1.3% der Berechnungsdauer abgeschlossen werden.

Führt man die vorgestellte Untersuchung für alle Datensätze des Realversuchs durch und trägt das Verhalten des Algorithmus äquivalent zur Wahrheitsmatrix in Tab. 7 gegen das reale Geschehen an, so ergibt sich das in Tab. 8 dargestellte Verhalten der Sicherheitsfunktion für Fahrer-Prädiktionsintervalle der Länge 100 ms bzw. 200 ms. Da die Sicherheitsfunktion für jeden Datensatz auslöst, entsprechen die Eintragungen der Anzahl der aufgetretenen bzw. vermiedenen Kollisionen im Versuch.

Dies ergibt für beide untersuchte Fahrer-Prädiktionsintervalle rechnerisch eine falsch-positiv-Rate von 31.11%. Dieser Wert ist jedoch zu hinterfragen, da im Realversuch eine Kollision jeweils nur verhindert werden konnte, wenn die Lenkeingaben des Menschen

Tab. 8: Verhalten der Sicherheitsfunktion gegenüber dem Versuchsgeschehen bei 100 ms Vorausschauzeit

	Kollision im Versuch	keine Kollision im Versuch
Algorithmus löst aus	31	14
Algorithmus löst nicht aus	0	0

zumindest für kurze Zeit in der Testgruppe *Assistenz mit ausgekoppeltem Fahrer* für die Fahrzeugsteuerung nicht berücksichtigt wurden. Die Annahme, dass die Versuchssituation bei menschlicher Fahrzeugsteuerung nicht beherrschbar ist und der Sicherheitsalgorithmus in der Simulation bei korrekter Funktionsweise immer auslösen muss, würde jedoch keine Überprüfung der Fehlauflöserate zulassen. Für diesen Fall wäre es sinnvoll, lediglich ein deutlich zu frühes Auslösen des Algorithmus als Fehlauflösung zu zählen. In der Simulation brach die Rechnung bei einem Fahrer-Prädiktionsintervall der Länge 100 ms in zwei Fällen bereits im ersten oder zweiten Schritt ab, für eine Vorausschauzeit von 200 ms passierte dies in zwölf Fällen (vgl. Anhang D für eine Auflistung der Ergebnisse und des Grundes der Beendigung der Simulation für alle Datensätze). Für diese Betrachtungsart ergäbe sich damit eine Fehlauflöserate von 4.44% bzw. von 26.67% für die jeweiligen Prädiktionszeiten.

6.3 Untersuchung anderer Interaktionsmechanismen

Die aufgebaute Sicherheitsfunktion kennt bisher nur zwei verschiedene Zustände. Entweder überprüft sie passiv im Hintergrund die Handlungsmöglichkeiten des Menschen oder sie ist vollständig aktiv und übersteuert den Fahrer vollständig. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die Sicherheitsfunktion um eine Zwischenstufe erweitert wurde, die noch eine Interaktion des Fahrers mit dem Fahrzeug zulässt, sie jedoch auf für die Situation sinnvolle Bereiche limitiert. Es sollen dabei zwei Interaktionsmechanismen näher betrachtet werden, die entweder den Fahrereinfluss auf die Längsführung, d.h. die angeforderte Beschleunigung, oder auf die Querführung, d.h. den nutzbaren Lenkbereich, einschränken. In der Untersuchung wird angenommen, dass die Sicherheitsfunktion auf Grund der Lage des Hindernisses und der Bewegungsrichtung des Fahrzeugs diese Zwischenstufe mit limitierter Fahrerinteraktion bereits ausgelöst hat und sie während der gesamten Untersuchung aktiv ist.

6.3.1 Beschränkung der Beschleunigungsänderung

In der ersten Untersuchung hat der menschliche Fahrer nur begrenzten Einfluss auf die Fahrzeuglängsführung, indem eine positive Beschleunigungsänderung des Fahrzeugs unterbunden wird. Dies wurde im bestehenden Simulationsmodell umgesetzt, indem im Fahrermodell die Beschleunigungsänderung in positive Richtung für alle Pedalbereiche zu Null gesetzt wurde. Wertet man nun den schon zuvor genutzten Datensatz für VP44 mit diesem Algorithmus für ein Fahrer-Prädiktionsintervall der Länge 200 ms aus, so ergibt sich der im Folgenden dargestellte Verlauf, wobei die Plots für alle Datenpunkte wieder in Anhang C zu finden sind.

Nach Initialisierung mit der Basislösung (einer Trajektorie mit leichtem Lenken nach links) findet die Funktion wieder die geradlinige Vollbremsung als beste Lösung. Für Größe und Verlauf der Erreichbarkeitsmengen entlang der Trajektorie können nahezu keine Unterschiede zur Lösung ohne Einschränkung des Fahrereinflusses festgestellt werden.

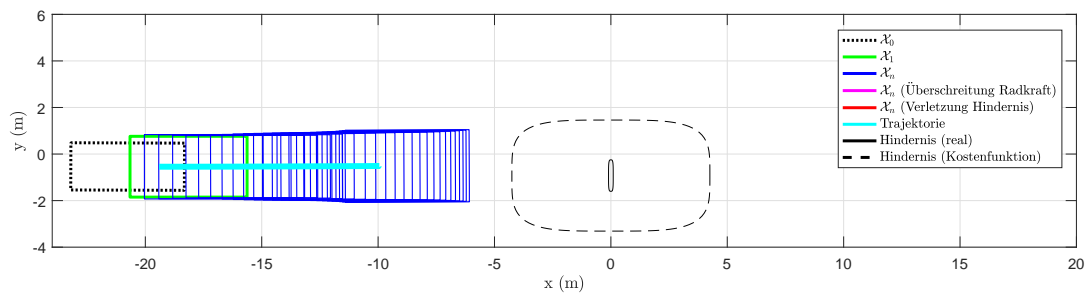


Abb. 43: Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie zum Datenpunkt bei $t_{d1} = 0.00$ s aus dem Versuch von VP44 für 200 ms Vorausschauzeit und Beschränkung der Längsführung

0.45 Sekunden nach dem ersten Datenpunkt wird der Zeitpunkt erreicht, an dem das System das Fahrzeug gerade noch vor dem Hindernis zu stehen bringen könnte.

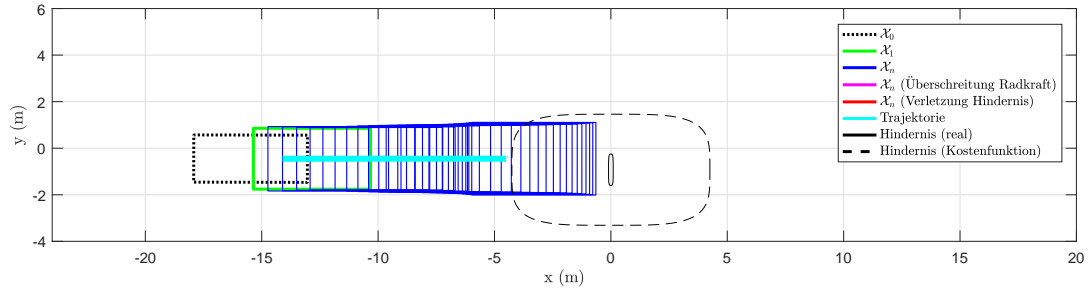


Abb. 44: Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie zum Datenpunkt bei $t_{d10} = 0.45$ s aus dem Versuch von VP44 für 200 ms Vorausschauzeit und Beschränkung der Längsführung

Anschließend kann trotz Vergrößerung des Hindernisses in der Kostenfunktion keine gültige Trajektorie am Hindernis vorbei gefunden werden.

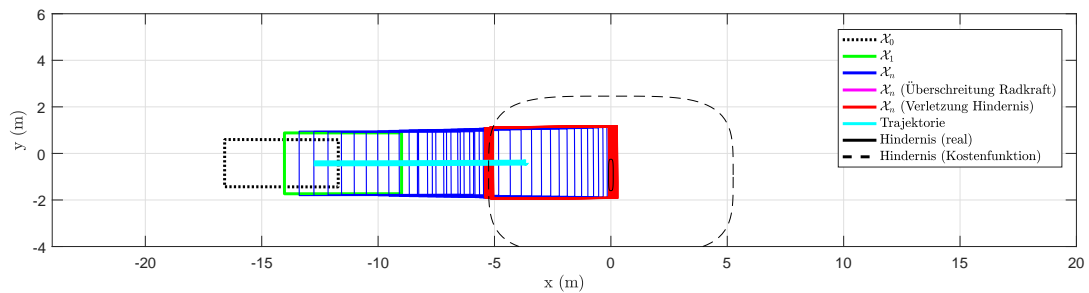


Abb. 45: Erreichbarkeitsmengen und (ungültige) Trajektorie zum Datenpunkt bei $t_{d11} = 0.50$ s aus dem Versuch von VP44 für 200 ms Vorausschauzeit und Beschränkung der Längsführung

Der Algorithmus bricht nach Neuinitialisierung der Trajektorie, wie schon bei der Simulation mit vollem Fahrereinfluss, bei der Berechnung der Erreichbarkeitsmengen in CORA ab, da dort die maximale Rekursionstiefe erreicht wurde.

Größe und Position der berechneten Erreichbarkeitsmengen liegen im Simulationsverlauf bei einer Beschränkung der Beschleunigungsänderung in positive Richtung sehr nahe am Ergebnis der ursprünglichen Variante mit vollständigem Fahrereinfluss. Damit kann die in Kap. 6.1 gezogene Schlussfolgerung, dass der Einfluss der Längsführung des menschlichen Fahrers auf die Größe der Erreichbarkeitsmengen nur klein ist, bestätigt werden. Der Einsatz einer solchen Variante des Sicherheitsalgorithmus ist nicht sinnvoll, da gegenüber dem ursprünglichen Algorithmus keine Verbesserungen erreicht werden konnten.

6.3.2 Beschränkung des Lenkbereichs

In der zweiten Untersuchung hat der Mensch nur begrenzten Einfluss auf die Fahrzeugquerführung, indem eine negative Änderung des Lenkwinkels unterbunden wird. Dies bedeutet, dass der Fahrer nicht nach rechts lenken kann. Dies wurde im bestehenden Simulationsmodell umgesetzt, indem im Fahrermodell die maximale Lenkwinkeländerung in negative Richtung zu Null gesetzt wurde. Wertet man wieder den Datensatz für VP44 mit diesem Algorithmus für ein Fahrer-Prädiktionsintervall der Länge 200 ms aus, so ergibt sich der im Folgenden dargestellte Verlauf, wobei die Plots für alle Datenpunkte, wie bei den vorherigen Auswertungen, wieder in Anhang C gefunden werden können.

Nach Initialisierung mit der Basislösung zeigt die Trajektorie leicht nach links. Durch die Änderung am Einflussvermögen des menschlichen Fahrers ist die Erreichbarkeitsmenge des Fahrzeugs nach Fahrerprädiktion leicht nach links rotiert. Dies liegt darin begründet, dass in dieser Menge nun alle Fahrzeugzustände zusammengefasst werden, bei denen das Lenkverhalten zwischen Geradeausfahrt und Lenken nach links liegt. Somit können alle Zustände, für die der Fahrer nach rechts lenken müsste, nicht mehr erreicht werden. Die gefundene Trajektorie bildet somit wieder den Pfad mit dem kürzestem Bremsweg ab und ist damit auch die optimale Lösung.

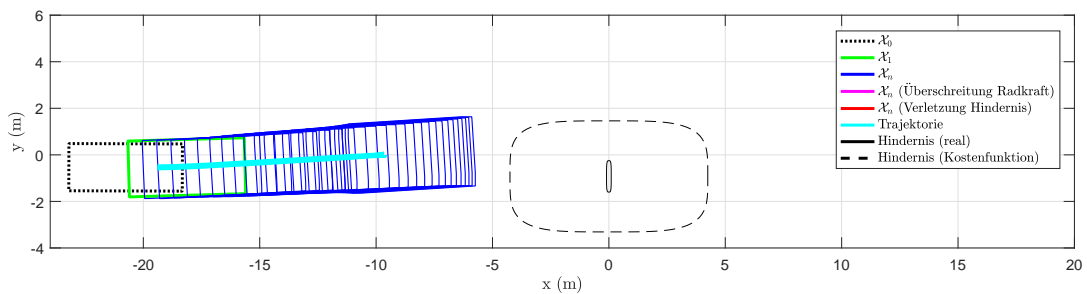


Abb. 46: Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie zum Datenpunkt bei $t_{d1} = 0.00$ s aus dem Versuch von VP44 für 200 ms Vorausschauzeit und Beschränkung der Querführung

0.45 Sekunden nach dem ersten Datenpunkt wird wieder der Zeitpunkt erreicht bei dem das System das Fahrzeug gerade noch vor dem Hindernis zu stehen bringen könnte. Die Trajektorie behält dabei ihre leichte Linkskrümmung bei.

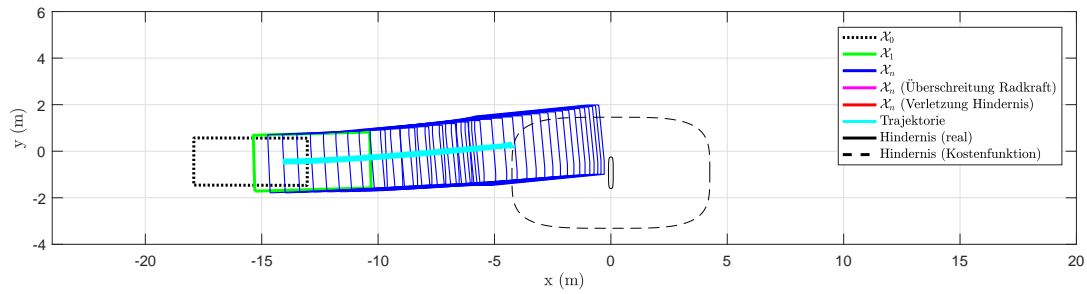


Abb. 47: Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie zum Datenpunkt bei $t_{d10} = 0.45$ s aus dem Versuch von VP44 für 200 ms Vorausschauzeit und Beschränkung der Querführung

Für diesen Interaktionsmechanismus findet der Algorithmus erstmals direkt beim ersten Versuch eine gültige Trajektorie, bei dem das Fahrzeug dem Hindernis ausweicht. Bei Berücksichtigung des vollen Handlungsspektrums in der Simulation hatte die Berechnung bereits zuvor abgebrochen.

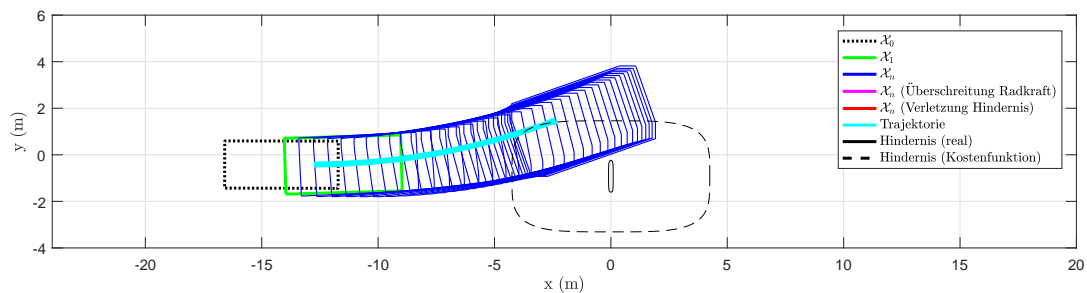


Abb. 48: Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie zum Datenpunkt bei $t_{d11} = 0.50$ s aus dem Versuch von VP44 für 200 ms Vorausschauzeit und Beschränkung der Querführung

Anschließend kann jedoch keine gültige Trajektorie mehr gefunden werden, da die Simulation auf Grund des Erreichens der maximalen Rekursionstiefe in CORA nicht mehr fortgesetzt werden kann.

Diese Variante des Sicherheitsalgorithmus stellt eine Verbesserung gegenüber der ursprünglichen Version dar. Einerseits wird beim Übergang zwischen den Bereichen, in denen maximale Verzögerung oder Ausweichen die optimale Lösung ist, auch ohne Neuinitialisierung direkt eine gültige Lösung gefunden. Andererseits ermöglicht sie eine geringere Einschränkung des Fahrers in seinem Verhalten, da ihm erst später die Kontrolle über das Fahrzeug entzogen werden muss, um die Sicherheit des Fahrzeugs zu gewährleisten.

Führt man die Simulation für alle vorhandenen Datensätze durch, so zeigt sich, dass auch diese Variante des Sicherheitsalgorithmus in allen Fällen auslöst und in Realität dem Fahrer vollständig die Kontrolle über das Fahrzeug entziehen würde, um es sicher in den Stillstand zu bringen. Damit ergibt sich wieder eine falsch-positiv-Rate von 31.11%. Legt man die zuvor diskutierte schwächere Definition einer Fehlauflösung zugrunde, erhält man bei 14 Auslösungen im ersten Schritt ebenfalls eine Fehlauflöserate von 31.11%.

Bei der Simulation mit dieser Variante des Sicherheitsalgorithmus wird die Auslösung der vollständigen Übersteuerung des Fahrers erstmals durch ein Überschreiten der maximalen Iterationen für einen Datenpunkt anstelle eines Fehlers in ACADO oder CORA veranlasst (vgl. Anhang D für eine Auflistung der Ergebnisse und des Grundes der Beendigung der Simulation für alle Datensätze). Der Algorithmus mit Beschränkung der menschlichen Querführung zeigt somit ein stabileres Verhalten in der Berechnung als die ursprüngliche Version.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Formale Absicherung bietet die Möglichkeit, die Anzahl der Testkilometer bei Auslegung und Absicherung von automatisierten Fahrfunktionen stark zu reduzieren. Über die Einbettung eines Fahrermodells kann dies auch bei geteilter Fahrzeugführung zwischen Mensch und Fahrfunktionen gezeigt werden. Dies wurde im ersten Kapitel dieser Arbeit dargelegt.

Im darauffolgenden Kapitel wurden die für diese Arbeit nötigen Grundlagen vorgestellt. Dabei wurde auf Gewährleistung des sicheren Betriebs von Kraftfahrzeugen, Ansätzen zur Modellierung des menschlichen Fahrverhaltens, bestehende Fahrzeugmodelle am DLR und Methoden zur Trajektorienplanung eingegangen. Da der Mensch auf absehbare Zeit Fahrzeuge selbst steuern wird, muss er auch im Sicherheitsnachweis berücksichtigt werden. Dass dies in bisherigen Studien jedoch nur unzureichend getan wurde, motiviert die Untersuchung in der vorliegenden Arbeit.

Der dritte Teil stellte die für Optimierung und Erreichbarkeitsanalyse eingesetzten Softwarepakete ACADO und CORA vor. Anschließend wurde Ablauf und Ergebnis einer zuvor durchgeführten Realstudie innerhalb des EU-Projekts interactIVe erläutert, deren Daten für diese Arbeit zur Verfügung standen.

In Kapitel vier wurde beschrieben, wie sich basierend auf den Daten der Realstudie die Parameter eines worst-case Fahrermodells ermitteln lassen. Dabei wurde zuerst der Ansatz verfolgt, die Fahrer-Fahrzeug Interaktion in Einflussvermögen des Menschen und dessen Vermittlung im Fahrzeug aufzuteilen. Für die Fahrzeugquerführung ließen sich damit gute Ergebnisse erzielen, für die Fahrzeuglängsführung war die Korrelation der Daten jedoch nicht gut genug ausgeprägt, als dass damit eine Vermittlungsfunktion hätte abgeleitet werden können. Es wurde deshalb der direkte Einfluss des Menschen auf die Beschleunigung des Fahrzeugs in drei Bereichen bestimmt, wobei die Bereiche entsprechend des durch den Fahrer betätigten Pedals gebildet wurden.

Im fünften Teil dieser Arbeit wurde der Aufbau des Simulationsmodells erläutert. Nach Einlesen der Messdaten wird über eine Erreichbarkeitsanalyse der mögliche Aufenthaltsbereich des Fahrzeugs nach Fahrerinteraktion abgeschätzt. Davon ausgehend muss unter Beachtung der Nebenbedingungen eine optimale, physikalisch mögliche und kollisionsfreie Trajektorie in den Stillstand gefunden werden. Der mögliche Aufenthaltsbereich des Fahrzeugs während des Manövers kann über eine Erreichbarkeitsanalyse entlang der errechneten Bahn bestimmt werden. Werden im Manöver die maximalen Radkräfte nicht überschritten und der Aufenthaltsbereich des Fahrzeugs überschneidet sich nicht

mit dem Hindernis, dann ist eine gültige Lösung gefunden, so dass in einem realen Fahrzeug die Interaktion des Fahrers mit dem Fahrzeug zugelassen werden kann. Genügt die bestimmte Lösung nicht den Anforderungen, so wird sie mit engeren Randbedingungen wiederholt, bis ein gültiges Manöver gefunden oder Abbruchbedingungen erreicht werden. Bei erfolglosem Ende der Suche würde im realen Fall die Fahrfunktion die Kontrolle des Fahrzeugs übernehmen und dieses mit dem letzten Notfallmanöver sicher in den Stillstand überführen.

Das sechste Kapitel beschreibt die Untersuchung des Absicherungskonzeptes. Dabei wurde zuerst auf den Einfluss von verschiedenen Teilen des Fahrermodells auf die Größe der Erreichbarkeitsmenge nach Fahrerprädiktion eingegangen. Es zeigte sich, dass der Fahrer bei kleinen Vorausschauzeiten die Menge nur geringfügig beeinflusst. Bei längeren Zeitintervallen dominiert die Querführung den möglichen Aufenthaltsbereich des Fahrzeugs, die Längsführung spielt nur eine untergeordnete Rolle. In den anschließenden Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass die Einbettung eines menschlichen Fahrers in einen formalen Sicherheitsnachweis grundsätzlich möglich ist (proof of concept). Im Bereich des Zeitbedarfs besteht bei den untersuchten Varianten die Notwendigkeit von Verbesserungen, da dieser aktuell deutlich größer ist als in Realität zur Verfügung stehen würde. Beim Vergleich des Simulationsergebnisses mit den Messdaten zeigte sich, dass die nötigen konservativen Annahmen im Sicherheitsnachweis dazu führen, dass die Sicherheitsfunktion immer auslöst, obwohl es im Versuch nicht unbedingt zu einer Kollision kam. Dies konnte auch in Varianten, die zusätzlich die Beschleunigungsänderung oder den Lenkbereich des Fahrers einschränken, nicht verbessert werden.

Vom derzeitigen Stand aus kann das Modell in verschiedene Richtungen weiterentwickelt werden. In der vorliegenden Untersuchung wurde stets von einem einzelnen, unbewegtem Hindernis ausgegangen. Grundsätzlich könnten jedoch auch mehrere Hindernisse verwendet werden, was sich aber nur über Anpassung der Kostenfunktion erreichen lässt. Die Bewegung des Hindernisses stellt dagegen kein Problem dar, da diese z.B. über zeitabhängige Koordinaten für das Zentrum umgesetzt werden könnte. Auch eine Veränderung der Größe des Kollisionshindernisses ist über eine zeitabhängige Skalierung der Halbachsen leicht umsetzbar.

Im Bereich der Prüfung auf Einhaltung der Radkräfte bietet sich eine weitere Möglichkeit zur Erweiterung des Simulationsmodells. Derzeit wird lediglich die Referenztrajektorie, d.h. das Ergebnis der Optimierung, überprüft. Da das Fahrzeug jedoch im Manöver jeden Zustand in seiner Erreichbarkeitsmenge einnehmen kann, müssen zur vollständigen Prüfung auf Gültigkeit der Trajektorie auch alle Zustände überprüft werden. Hier könnten durch Nutzung des geregelten Fahrzeugmodells die Intervalle der Steuerungseingaben bestimmt und damit die Radkräfte für jeden Zustand errechnet und überprüft werden.

Es ist außerdem auffällig, dass der Algorithmus häufig abbrechen muss, weil in CORA die maximale Rekursionstiefe erreicht wurde. Über die Wahl eines noch kleineren Zeitabstandes der zu berechnenden Erreichbarkeitsmengen, kann dies manchmal verhindert werden, was jedoch dem Wunsch nach Reduzierung der Rechenzeit entgegensteht. Hier sollten Verbesserungen vorgenommen werden, damit es in mehr Fällen möglich ist, ein Berechnungsergebnis zu erhalten, auch wenn dies insgesamt eventuell eine konservativere Abschätzung bedeuten würde.

Zusätzlich kann eine weitere Variation des Sicherungsalgorithmus eingesetzt werden. Derzeit führt die Funktion, sobald sie ausgelöst wird, das Fahrzeug vollständig in den Stillstand. Eine Alternative wäre jedoch, auch beim Folgen der Notfalltrajektorie weiterhin zu prüfen, ob eine Fahrerinteraktion noch kritisch ist. Kann dies verneint werden, könnte die Möglichkeit zur Fahrzeugführung wieder an den Menschen zurückgegeben werden, so dass diesem bei kurzen Gefahrensituationen der Eingriff des Systems evtl. gar nicht bewusst wird. Die Akzeptanz der Nutzer für die Sicherheitsfunktion könnte damit erheblich steigen.

Insgesamt wurde das Ziel der Arbeit, ein menschliches Fahrermodell in einen formalen Sicherheitsnachweis einzubetten, erreicht. Durch die Nutzung weiterer Datenquellen oder der Durchführung von Tests mit Probanden, bei denen menschliche Fahrer ohne Nutzung von Assistenzfunktionen Kollisionsszenarien ausgesetzt werden, kann die Fehlauflöserate des in dieser Arbeit aufgebauten Systems genauer untersucht werden. Zusätzlich ist es möglich mit einem größeren Datensatz das Fahrermodell noch weiter zu verbessern und abzusichern, so dass es das menschliche Leistungsvermögen noch genauer widerspiegelt. Neben einer zuverlässigeren Vorhersage im erstellten Simulationsmodell, würde damit auch eine Lücke im generellen Forschungsstand geschlossen.

Literatur

- [1] ABUALI, Najah ; ABOU-ZEID, Hatem: Driver Behavior Modeling: Developments and Future Directions. In: *International Journal of Vehicular Technology* 2016 (2016). – ISSN 1687–5702
- [2] ALESSANDRETTI, Giancarlo ; AMDITIS, Angelos ; METZNER, Sarah ; JOHANNSON, Emma ; FAHRENKROG, Felix: *interactIVe - Deliverable D1.9: Final Report*. 2014
- [3] ALTHOFF, Matthias: An Introduction to CORA 2015. In: *Proc. of the Workshop on Applied Verification for Continuous and Hybrid Systems* (2015)
- [4] ALTHOFF, Matthias ; KROGH, Bruce: Zonotope bundles for the efficient computation of reachable sets. In: *2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC)* (2011)
- [5] BACIC, Marko: On hardware-in-the-loop simulation. In: *Proc. 44th IEEE Conf. Decision and Control* (2005), S. 3194–3198
- [6] BANERJEE, Amitav ; CHITNIS, U. B. ; JADHAV, S. L. ; BHAWALKAR, J. S. ; CHAUDHURY, S.: Hypothesis testing, type I and type II errors. In: *Industrial psychiatry journal* 18 (2009), Nr. 2, S. 127–131. – ISSN 0976–2795
- [7] BEANLAND, Vanessa ; FITZHARRIS, Michael ; YOUNG, Kristie ; LENNÉ, Michael: Driver inattention and driver distraction in serious casualty crashes: Data from the Australian National Crash In-depth Study. In: *Accident Analysis & Prevention* 54 (2013), S. 99–107. – ISSN 0001–4575
- [8] BENDERIUS, Ola: *Modelling driver steering and neuromuscular behaviour*, Chalmers University of Technology, Dissertation, 2014
- [9] BORRELLI, Francesco ; BEMPORAD, Alberto ; MORARI, Manfred: Predictive Control for linear and hybrid systems. In: *UC Berkley* (2014)
- [10] CONTINENTAL AG: *Fährt in Zukunft der Fahrer das Auto oder das Auto den Fahrer?* <https://www.continental-corporation.com/de/produkte-und-innovationen/innovationen/automatisiertes-fahren/faehrt-in-zukunft-der-fahrer-das-auto-oder-das-auto-den-fahrer--15138>. – aufgerufen am 26.08.2017
- [11] CUBILLO, Javier ; SCHULER, Simone ; HESS, Daniel ; PRANDINI, Maria ; BURGIN, Mark: *UnCoVerCPS Deliverable D5.1: Report on Application Models*. 2015

-
- [12] DE WINTER, Joost ; DODOU, Dimitra: Preparing drivers for dangerous situations: A critical reflection on continuous shared control. In: *2011 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)* (2011), S. 1050–1056
- [13] DEML, Barbara ; NEUMANN, Hendrik ; MÜLLER, Andre ; WÜNSCHE, Hans-Joachim: Implementierung eines Fahrermodells in die Simulationsumgebung eines autonomen Fahrzeugs. In: *Automatisierungstechnik, Schwerpunkt Themenheft: Kognitive Automobile* (2007)
- [14] DING, Jerry ; LI, Eugene ; HUANG, Haomiao ; TOMLIN, Claire: Reachability-based synthesis of feedback policies for motion planning under bounded disturbances. In: *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (2011)
- [15] DYNAMIC WORKS GMBH: *Informationen zum VW Passat*. <https://www.angurten.de/is/abmessungen/1285-Passat>. – aufgerufen am 27.08.2017
- [16] EURO NCAP: *Autonomous Emergency Braking*. <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-rewards-explained/autonomous-emergency-braking/>. – aufgerufen am 26.08.2017
- [17] FORKENBROCK, Garrick ; ELSASSER, Devin: *An assessment of human driver steering capability* (DOT HS 809 875)
- [18] FORKENBROCK, Garrick ; O’HARRA, Bryan ; ELSASSER, Devin: *A demonstration of the dynamic tests developed for NHTSA’s NCAP rollover rating system-Phase VIII of NHTSA’s light vehicle rollover research program* (DOT HS 809 705)
- [19] FREE SOFTWARE FOUNDATION: *GNU Lesser General Public License: Version 3*. <http://www.gnu.org/licenses/lgpl-3.0.en.html>. – aufgerufen am 24.07.2017
- [20] GAO, Yiqi ; GRAY, Andrew ; TSENG, H. E. ; BORRELLI, Francesco: A tube-based robust nonlinear predictive control approach to semiautonomous ground vehicles. In: *Vehicle System Dynamics* 52 (2014), Nr. 6, S. 802–823. – ISSN 0042–3114
- [21] GILLULA, Jeremy ; HUANG, Haomiao ; VITUS, Michael ; TOMLIN, Claire: Design of guaranteed safe maneuvers using reachable sets: Autonomous quadrotor aerobatics in theory and practice. In: *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (2010), S. 1649–1654
- [22] GODTHELP, Hans: Vehicle control during curve driving. In: *Human Factors* 28 (1986), Nr. 2, S. 211–221. – ISSN 0018–7208

-
- [23] GONZÁLEZ, David ; PÉREZ, Joshué ; MILANÉS, Vicente ; NASHASHIBI, Fawzi: A review of motion planning techniques for automated vehicles. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 17 (2016), Nr. 4, S. 1135–1145. – ISSN 1524–9050
- [24] GONZÁLEZ, Ramón ; FIACCHINI, Mirko ; GUZMÁN, José Luis ; ÁLAMO, Teodoro ; RODRÍGUEZ, Francisco: Robust tube-based predictive control for mobile robots in off-road conditions. In: *Robotics and Autonomous Systems* 59 (2011), Nr. 10, S. 711–726. – ISSN 0921–8890
- [25] HARTUNG, Marianne ; HESS, Daniel ; OEHLERKING, Jens ; PÉREZ, Joshué ; LATTARULO, Ray ; RAUSCH, Alexander: *UnCoVerCPS Deliverable D5.2: Report on Conformance Testing of Application Models*
- [26] HEESEN, Matthias ; DZIENNUS, Marc ; HESSE, Tobias ; SCHIEBEN, Anna ; BRUNKEN, Claas ; LÖPER, Christian ; KELSCH, Johann ; BAUMANN, Martin: Interaction design of automatic steering for collision avoidance: Challenges and potentials of driver decoupling. In: *IET intelligent transport systems* 9 (2014), Nr. 1, S. 95–104. – ISSN 1751–9578
- [27] HEINRICH, Daniel: *Modellierung des Fahrerverhaltens zur Ermittlung von Bauteilbelastungen im Fahrzeugantriebsstrang*, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2016
- [28] HESS, Daniel ; ALTHOFF, Matthias ; SATTEL, Thomas: Formal verification of maneuver automata for parameterized motion primitives. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2014. – ISBN 1479969346, S. 1474–1481
- [29] HESS, Daniel ; LÖPER, Christian ; HESSE, Tobias: Safe Cooperation of Automated Vehicles. In: ITS AUTOMOTIVE NORD E.V. (Hrsg.): *AAET Automatisiertes und vernetztes Fahren*. Braunschweig : ITS Automotive Nord, 2017. – ISBN 978–3–937655–41–3, S. 308–334
- [30] HESS, Daniel ; SCHÜRMANN, Bastian ; FORETS, Marcelo ; FREHSE, Goran: *UnCoVerCPS Deliverable D3.2: Report on Precomputation of Reachable Sets and Advances in Reachability Analysis*. 2017
- [31] HESSE, Tobias ; SCHIEBEN, Anna ; HEESEN, Matthias ; DZIENNUS, Marc ; GRIESCHE, Stefan ; KÖSTER, Frank: Interaction design for automation initiated steering manoeuvres for collision avoidance. In: *Tagung Fahrerassistenzsysteme* (2013)

-
- [32] HEYMANN, Eric ; MEISTER, Janina: *Das "digitale Auto": Mehr Umsatz, mehr Konkurrenz, mehr Kooperation*. 2017 (Deutschland-Monitor)
- [33] HOUSKA, Boris ; FERREAU, Hans J. ; DIEHL, Moritz: ACADO toolkit—An open-source framework for automatic control and dynamic optimization. In: *Optimal Control Applications and Methods* 32 (2011), Nr. 3, S. 298–312. – ISSN 1099–1514
- [34] HOWARD, Thomas ; KELLY, Alonzo: Optimal rough terrain trajectory generation for wheeled mobile robots. In: *The International Journal of Robotics Research* 26 (2007), Nr. 2, S. 141–166. – ISSN 0278–3649
- [35] HWANG, Joo Y. ; KIM, Jun S. ; LIM, Sang S. ; PARK, Kyu H.: A fast path planning by path graph optimization. In: *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-part a: systems and humans* 33 (2003), Nr. 1, S. 121–129. – ISSN 1083–4427
- [36] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION: *IEC 61508: Functional Safety of Electrical / Electronic/ Programmable Electronic Safety-related Systems*. 1999
- [37] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: *ISO 3888-2: Passenger cars – Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 2*. 2002
- [38] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: *ISO 26262-1: road vehicles functional safety*. 2011
- [39] JARRE, Florian ; STOER, Josef: *Optimierung*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2004 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 3642187854
- [40] JO, Kichun ; KIM, Junsoo ; KIM, Dongchul ; JANG, Chulhoon ; SUNWOO, Myoung-ho: Development of autonomous car—Part I: Distributed system architecture and development process. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 61 (2014), Nr. 12, S. 7131–7140. – ISSN 0278–0046
- [41] KALRA, Nidhi ; PADDOCK, Susan: Driving to safety: How many miles of driving would it take to demonstrate autonomous vehicle reliability? In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 94 (2016), S. 182–193. – ISSN 0965–8564
- [42] KIM, Jong-Hae ; HAYAKAWA, Soichiro ; SUZUKI, Tatsuya ; HAYASHI, Koudai ; OKUMA, Shigeru ; TSUCHIDA, Nuio ; SHIMIZU, Masayuki ; KIDO, Shigeyuki: Modeling of driver's collision avoidance maneuver based on controller switching model. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)* 35 (2005), Nr. 6, S. 1131–1143. – ISSN 1083–4419

-
- [43] KOSFELD, Reinhold ; ECKEY, Hans-Friedrich ; TÜRCK, Matthias: *Deskriptive Statistik: Grundlagen - Methoden - Beispiele - Aufgaben*. 6. Auflage. 2016 (Lehrbuch). – ISBN 978-3-658-13640-6
- [44] LEITNER-FISCHER, Florian ; LEUE, Stefan: The quantum approach in the context of the iso standard 26262 for automotive systems. (2011)
- [45] LOOS, Sarah M. ; PLATZER, André ; NISTOR, Ligia: Adaptive Cruise Control: Hybrid, Distributed, and Now Formally Verified. In: *FM* 6664 (2011), S. 42–56
- [46] MAGNUS, Kurt ; POPP, Karl ; SEXTRO, Walter: *Schwingungen: Physikalische Grundlagen und mathematische Behandlung von Schwingungen*. 9., überarb. Aufl. 2013. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. – ISBN 9783834825759
- [47] MARKKULA, Gustav: Modeling driver control behavior in both routine and near-accident driving. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 1 (2014)
- [48] MAYNE, David ; KERRIGAN, Eric ; FALUGI, Paola: Robust model predictive control: Advantages and disadvantages of tube-based methods. In: *IFAC Proceedings Volumes* 44 (2011), Nr. 1, S. 191–196. – ISSN 1474-6670
- [49] MITSCHKE, Manfred ; WALLENTOWITZ, Henning: *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. 4., neubearb. Aufl. Berlin : Springer, 2004 (VDI). – ISBN 3-540-42011-8
- [50] MOON, Seungwuk ; YI, Kyongsu: Human driving data-based design of a vehicle adaptive cruise control algorithm. In: *Vehicle System Dynamics* 46 (2008), Nr. 8, S. 661–690. – ISSN 0042-3114
- [51] PEETA, Srinivas ; YU, Jeong: Adaptability of a hybrid route choice model to incorporating driver behavior dynamics under information provision. In: *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-part a: systems and humans* 34 (2004), Nr. 2, S. 243–256. – ISSN 1083-4427
- [52] PISCHINGER, Stefan (Hrsg.) ; SEIFFERT, Ulrich (Hrsg.): *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 8., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2016 (ATZ / MTZ-Fachbuch). – ISBN 978-3-658-09527-7
- [53] RANNEY, Thomas: Models of driving behavior: A review of their evolution. In: *Accident Analysis & Prevention* 26 (1994), Nr. 6, S. 733–750. – ISSN 0001-4575
- [54] ROSÉN, Erik: Autonomous emergency braking for vulnerable road users. In: *Proceedings of IRCOBI conference* (2013), S. 618–627

-
- [55] SALEH, Louay ; CHEVREL, Philippe ; MARS, Franck ; LAFAY, Jean-François ; CLAVEAU, Fabien: Human-like cybernetic driver model for lane keeping. In: *IFAC Proceedings Volumes* 44 (2011), Nr. 1, S. 4368–4373. – ISSN 1474–6670
- [56] SCHOMERUS, Jan ; MOSEBACH, Henning: EU Project HAVEit, Deliverable D41. 2: Components (including steer-by-wire) available, installed and working. (2010)
- [57] SCHRAMM, Dieter ; HILLER, Manfred ; BARDINI, Roberto: *Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen*. 2., vollst. überarb. Aufl. Berlin : Springer Vieweg, 2013 (SpringerLink). – ISBN 978–3–642–33887–8
- [58] SIMMONS, REID AND BROWNING, BRETT AND ZHANG, YILU AND SADEKAR, VARSHA: Learning to predict driver route and destination intent. In: *Intelligent Transportation Systems Conference* (2006), S. 127–132
- [59] SINGH, Ashok ; BHADARIA, Beer: Finite difference formulae for unequal sub-intervals using lagrange’s interpolation formula. In: *International Journal of Math. Analysis* 3 (2009), Nr. 17, S. 815–827
- [60] STENTZ, Anthony: Optimal and efficient path planning for partially-known environments. In: *1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (1994), S. 3310–3317
- [61] SUMMALA, Heikki: Brake reaction times and driver behavior analysis. In: *Transportation Human Factors* 2 (2000), Nr. 3, S. 217–226. – ISSN 1093–9741
- [62] TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT: *PRORETA*. <http://www.proreta.tu-darmstadt.de/proreta/>. – aufgerufen am 25.08.2017
- [63] TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN: *Unifying Control and Verification of Cyber-Physical Systems (UnCoVerCPS)*. 2014
- [64] THOLE, Niels: *Formal Verification throughout the Development of Robust Systems*, Universität Bremen, Diss., 2016
- [65] TURAU, Volker ; WEYER, Christoph: *Algorithmische Graphentheorie*. 4., erweiterte und überarbeitete Auflage. 2015 (De Gruyter Studium). – ISBN 978–3–11–042000–5
- [66] VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE: Automatisierung: Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren. In: *VDA, Berlin* (2015)
- [67] VOLKSWAGEN: *Der neue Passat – Generation 8. Technik-Preview*

-
- [68] WANG, Wenshuo ; XI, Junqiang ; CHEN, Huiyan: Modeling and recognizing driver behavior based on driving data: A survey. In: *Mathematical Problems in Engineering* 2014 (2014)
- [69] WEISSTEIN, Eric: *Superellipse. From MathWorld - A Wolfram Web Resource*. <http://mathworld.wolfram.com/Superellipse.html>. – aufgerufen am 18.08.2017
- [70] WINNER, Hermann ; HAKULI, Stephan ; LOTZ, Felix: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. 3., überarb. u. erg. Aufl. 2015. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015 (ATZ/MTZ-Fachbuch). – ISBN 978-3-658-05734-3
- [71] YOUNG, Kristie ; SALMON, Paul ; CORNELISSEN, Miranda: Distraction-induced driving error: An on-road examination of the errors made by distracted and undistracted drivers. In: *Accident Analysis & Prevention* 58 (2013), S. 218–225. – ISSN 0001-4575
- [72] ZHAO, Min ; KÄTHNER, David ; JIPP, Meike: Modeling driver intention and behavior at roundabouts. In: *Proceedings 4. Interdisziplinärer Workshop Kognitive Systeme*, 2015
- [73] ZIEGLER, Julius: *Optimale Bahn-und Trajektorienplanung für Automobile*, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2015

Anhang

A Versuchsaufbau der Realstudie im Projekt interactIVe

Abb. 49 zeigt die Versuchsstrecke des Realversuchs im Projekt interactIVe auf dem Gelände der Kaserne „Heinrich der Löwe“ in Braunschweig. Die Stelle des Kollisionsszenarios ist in rot markiert.

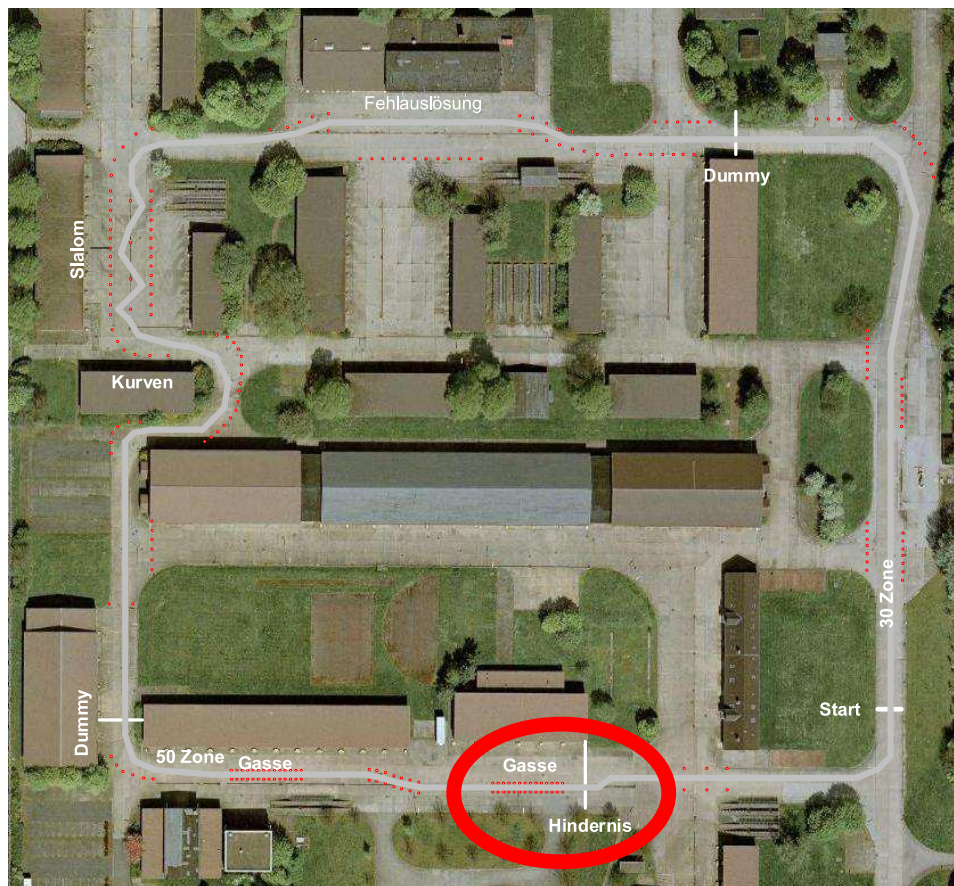
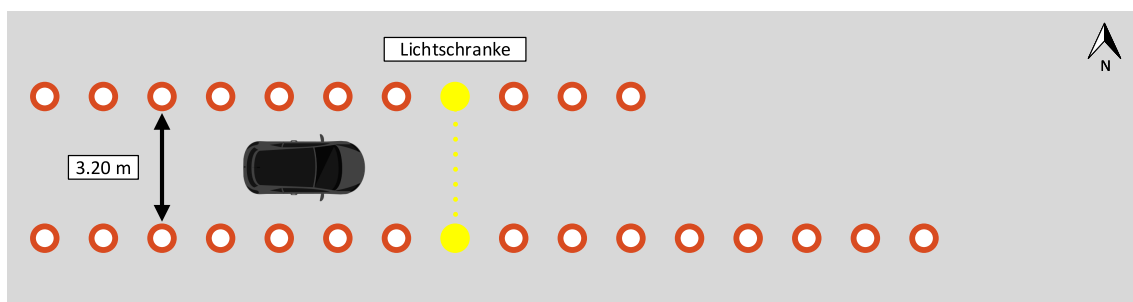


Abb. 49: Versuchsstrecke des Realversuchs im Projekt interactIVe

In Abb. 50 ist der Versuchsablauf der Situation mit drohender Kollision dargestellt. Nach Durchfahren der Lichtschranke erscheint das Hindernis für den Fahrer.



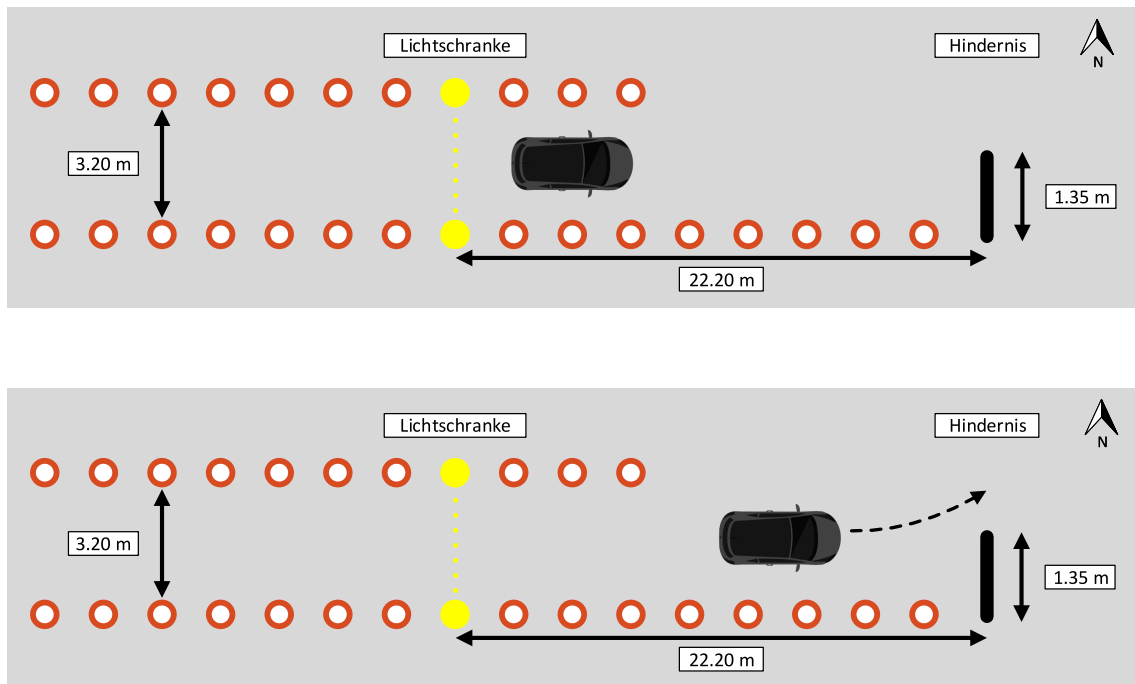


Abb. 50: Versuchsablauf der Situation mit drohender Kollision im Realversuch in der interactIVe Studie

B Parameter für CORA bei der Berechnung

Die Toolbox CORA wird in der Simulation zur Bestimmung von Erreichbarkeitsmengen an zwei Stellen eingesetzt. Tab. 9 listet die verwendeten Parameter bei der Fahrerprädiktion auf, in Tab. 10 sind die genutzten Parameter bei Bestimmung der Erreichbarkeitsmengen entlang der optimierten Trajektorie dargestellt. Beim Aufbau der Simulation wurden diese jeweils durch iteratives Testen ermittelt.

Tab. 9: Parameter für CORA bei Berechnung des Fahrereinflusses

Parameter für CORA	Wert
n	8
m	2
path	pwd()
maxError	1000*ones(8,1)
taylorTerms	5
zonotopeOrder	100
intermediateOrder	80
u	0
U	[wird in jedem Schritt entsprechend dem Fahrermodell neu gesetzt]
uTrans	zeros(2,1)
advancedLinErrorComp	0
tensorOrder	2
errorOrder	10
oldError	zeros(8,1)
reductionInterval	inf
reductionTechnique	'girard'
postProcessingTechnique	'girard'
linError_mixed_noInt	0
use_affari	0

Tab. 10: Parameter für CORA bei Berechnung der Erreichbarkeitsmengen entlang der Trajektorie

Parameter für CORA	Wert
n	8
m	2

path	pwd()
maxError	1E12*ones(8,1)
taylorTerms	5
zonotopeOrder	800
intermediateOrder	400
u	0
U	zonotope([zeros(2,1),diag(e_a, e_delta)])
uTrans	zeros(2,1)
advancedLinErrorComp	0
tensorOrder	2
errorOrder	10
oldError	zeros(8,1)
reductionInterval	inf
reductionTechnique	'girard'
postProcessingTechnique	'girard'
linError_mixed_noInt	0
use_affari	0

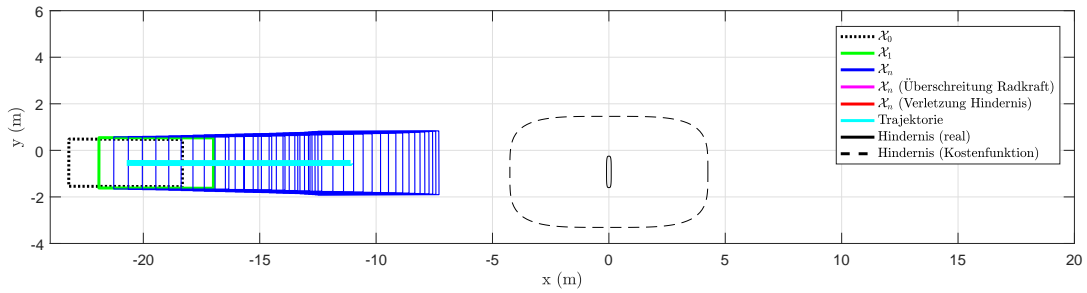
C Darstellung der Erreichbarkeitsmengen mit Hindernis für den Datensatz VP44 für die verschiedenen Untersuchungsarten

Im Folgenden werden die Plots der Simulationsergebnisse für den Datensatz VP44 für die verschiedenen Untersuchungsarten dargestellt. Die Auswertung erfolgte dabei jeweils für Sicherheitsfunktion mit einem Fahrer-Prädiktionsintervall der Länge 100 ms, für Sicherheitsfunktion mit einem Fahrer-Prädiktionsintervall der Länge 200 ms, für Sicherheitsfunktion mit beschränkter Beschleunigungsänderung durch den Fahrers mit einem Prädiktionsintervall der Länge 200 ms sowie für Sicherheitsfunktion mit beschränktem Lenkbereich des Fahrers mit einem Prädiktionsintervall der Länge 200 ms.

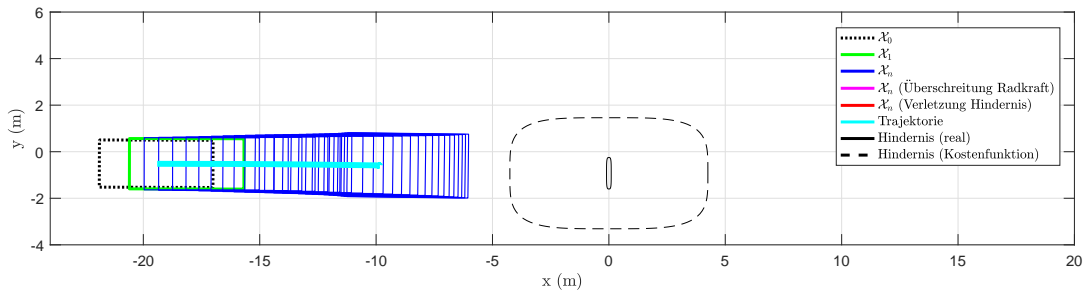
Zwei aufeinanderfolgende Messpunkte sind dabei sehr ähnlich, da die Positions- und Geschwindigkeitswerte in der Messreihe nur in jedem zweiten Schritt aktualisiert wurden. Es werden deshalb i.d.R. nur Messpunkte mit ungerader Nummerierung dargestellt. Ungültige Lösungen sind nach rechts eingerückt dargestellt.

Sicherheitsfunktion mit einem Fahrer-Prädiktionsintervall der Länge 100 ms

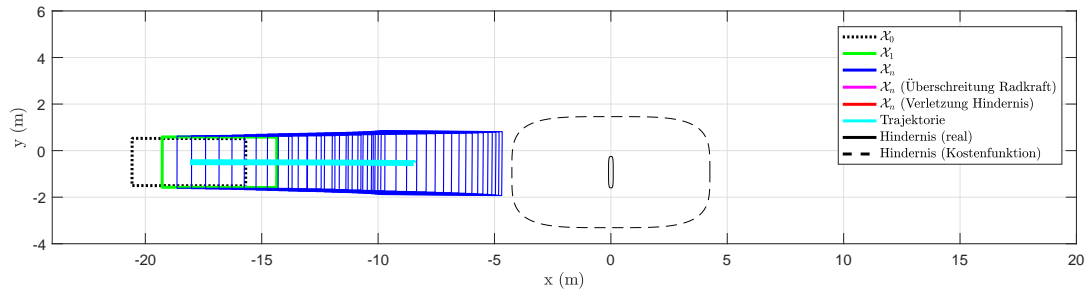
$$t_{d1} = 0.00 \text{ s}$$



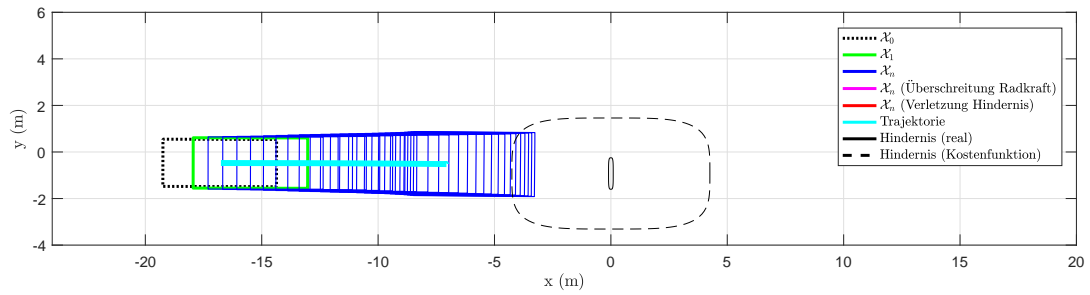
$$t_{d3} = 0.10 \text{ s}$$



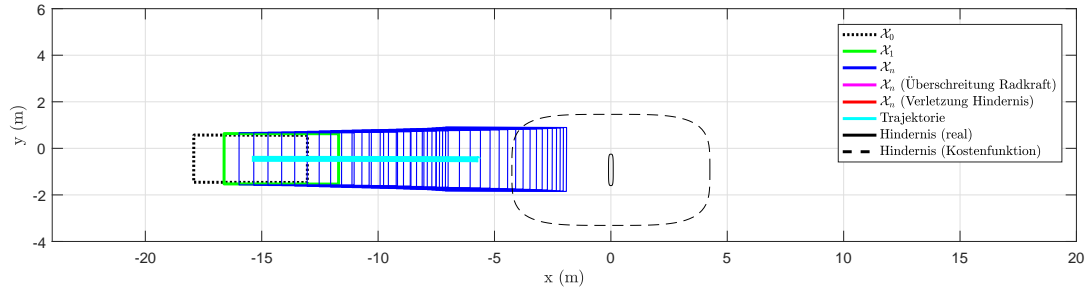
$$t_{d5} = 0.20 \text{ s}$$



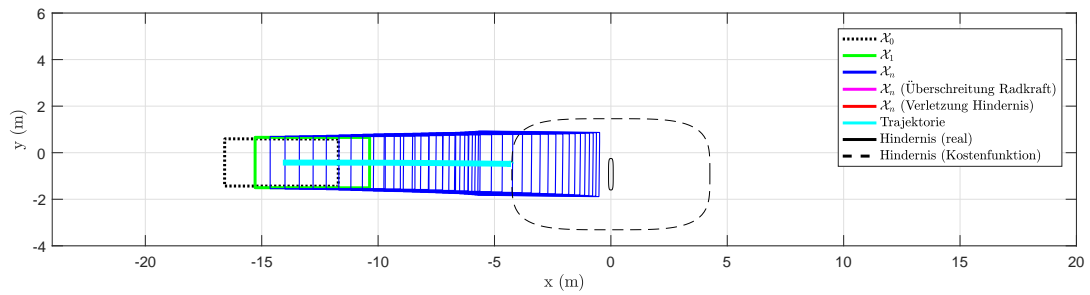
$$t_{d7} = 0.30 \text{ s}$$



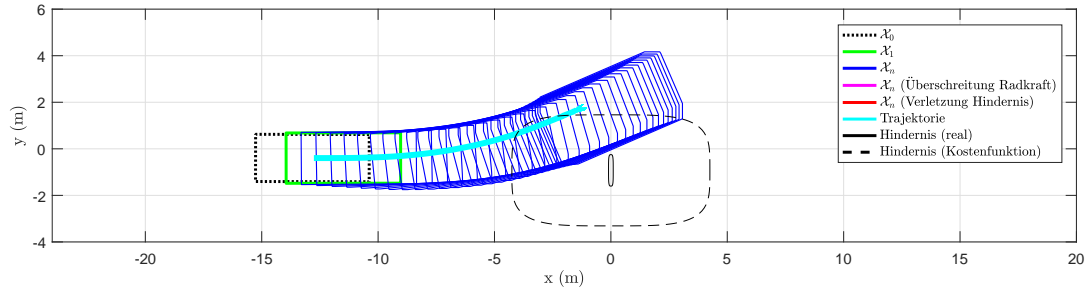
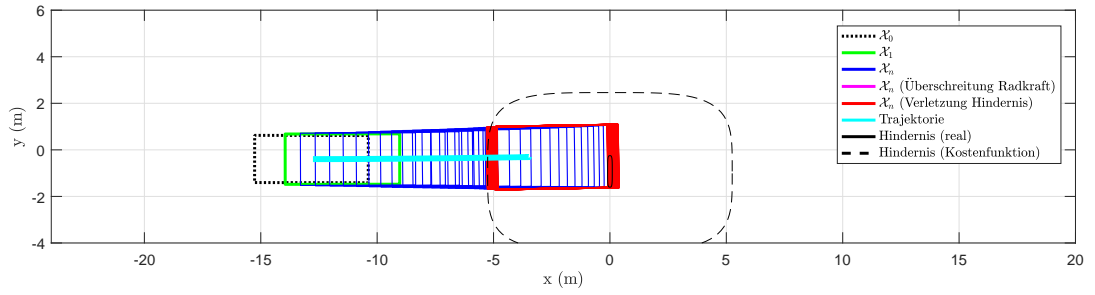
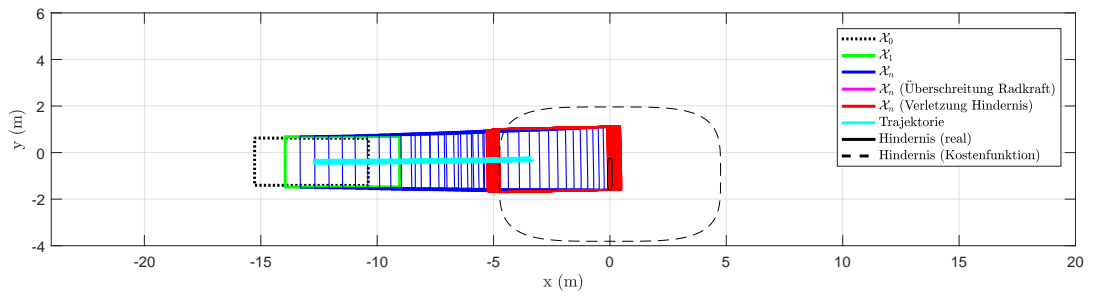
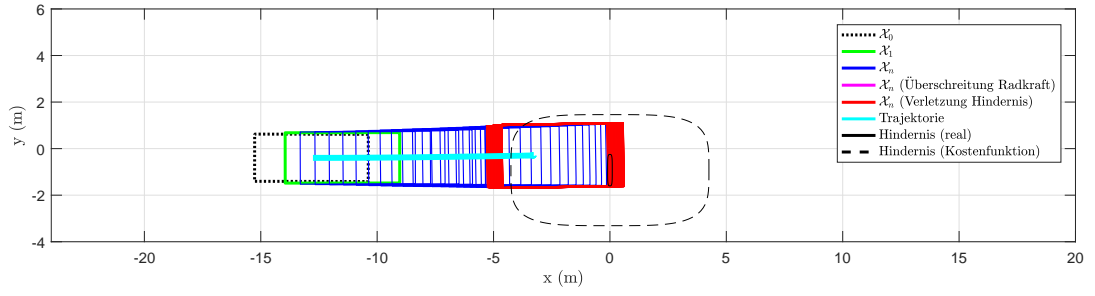
$$t_{d9} = 0.40 \text{ s}$$



$$t_{d11} = 0.50 \text{ s}$$



$$t_{d13} = 0.60 \text{ s}$$



$$t_{d15} = 0.70 \text{ s}$$

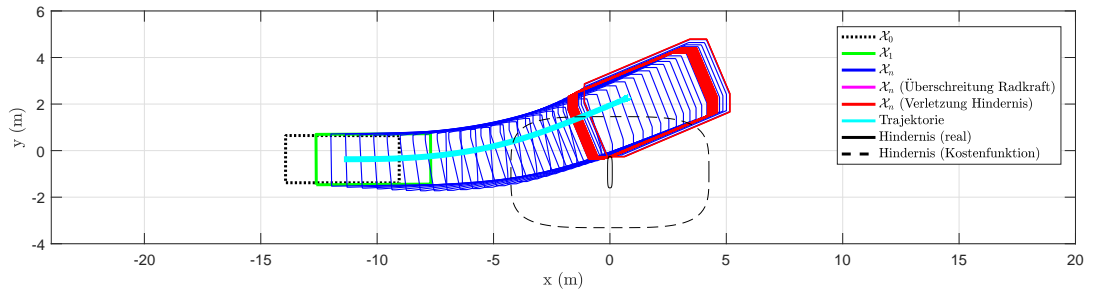
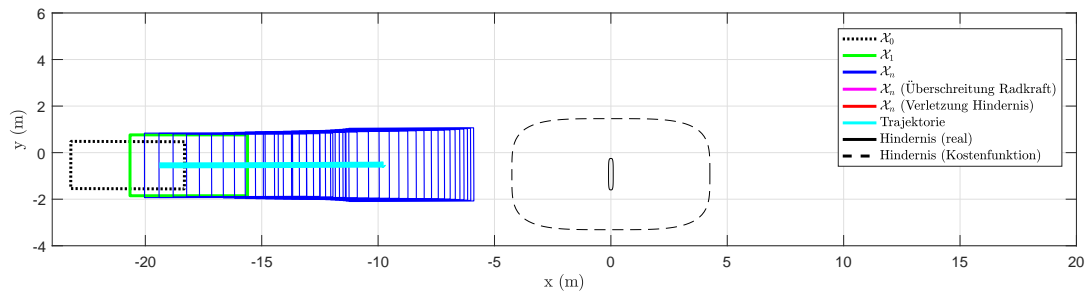


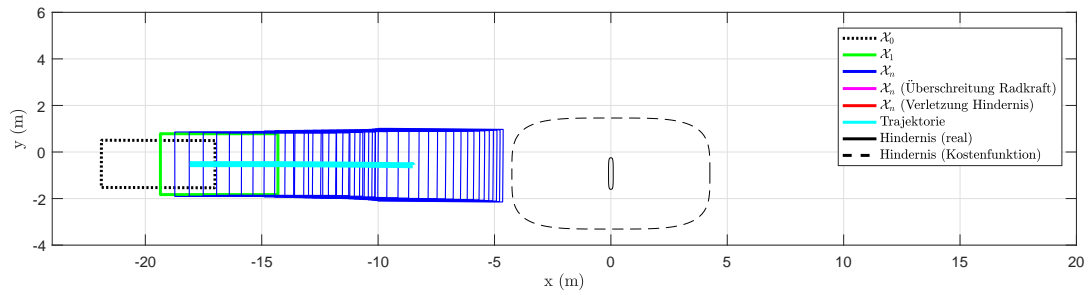
Abb. 51: Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie für alle untersuchten Datenpunkte aus dem Versuch von VP44 für 100 ms Vorausschauzeit

Sicherheitsfunktion mit einem Fahrer-Prädiktionsintervall der Länge 200 ms

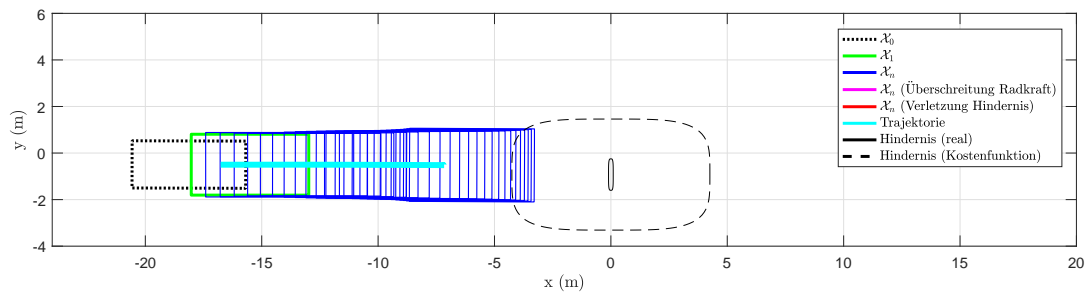
$$t_{d1} = 0.00 \text{ s}$$



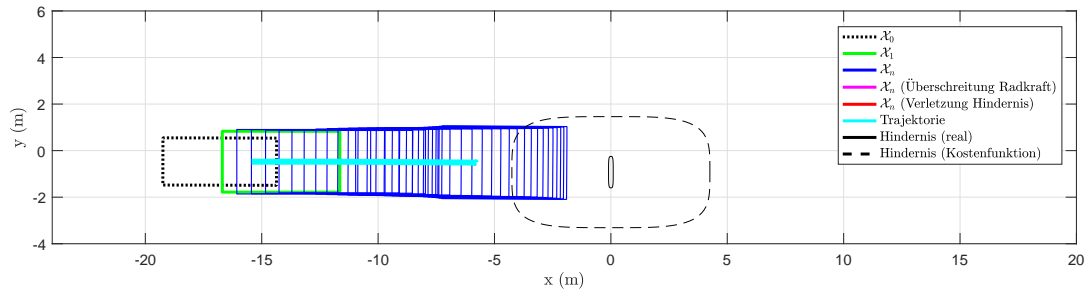
$$t_{d3} = 0.10 \text{ s}$$



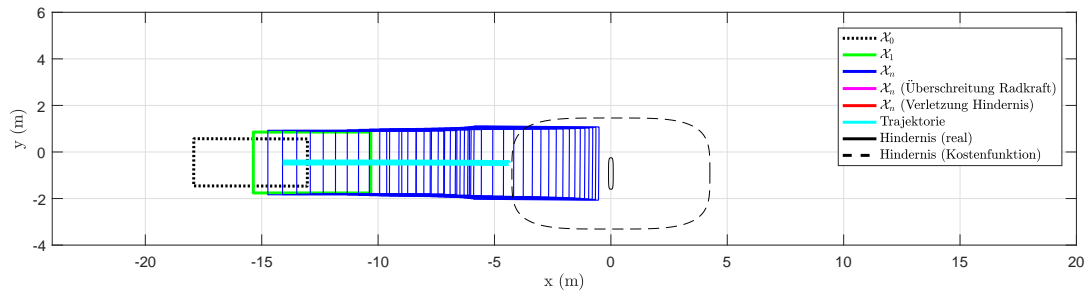
$$t_{d5} = 0.20 \text{ s}$$



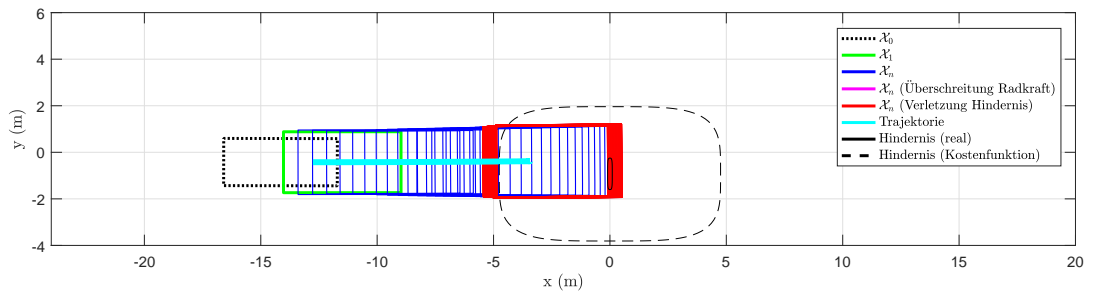
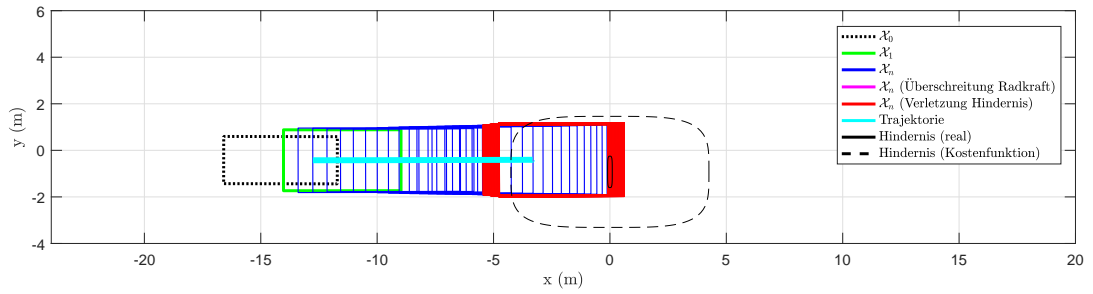
$$t_{d7} = 0.30 \text{ s}$$



$$t_{d9} = 0.40 \text{ s}$$



$$t_{d11} = 0.50 \text{ s}$$



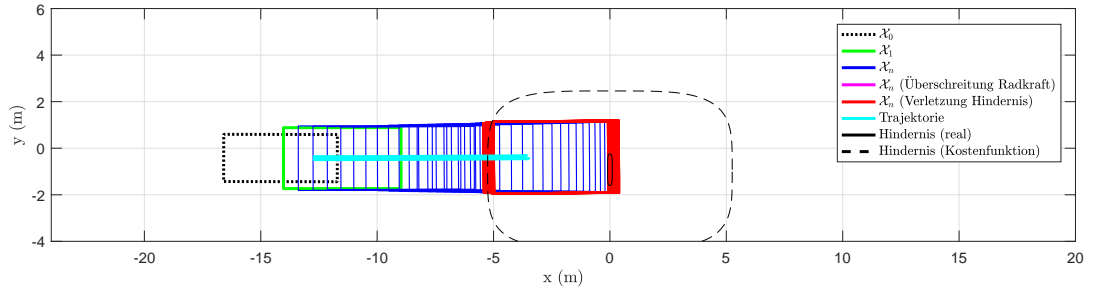
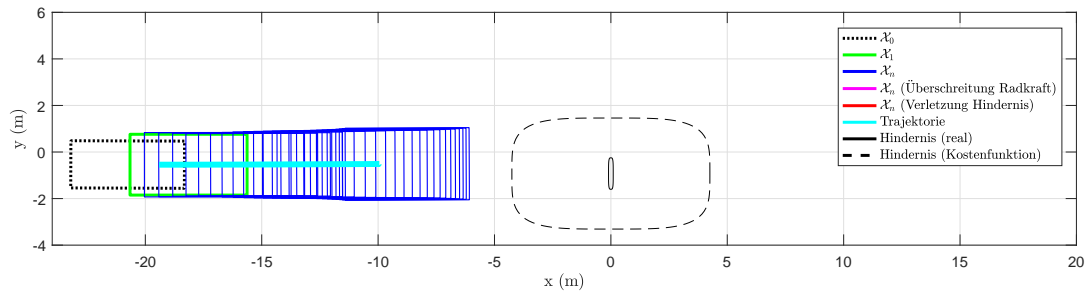


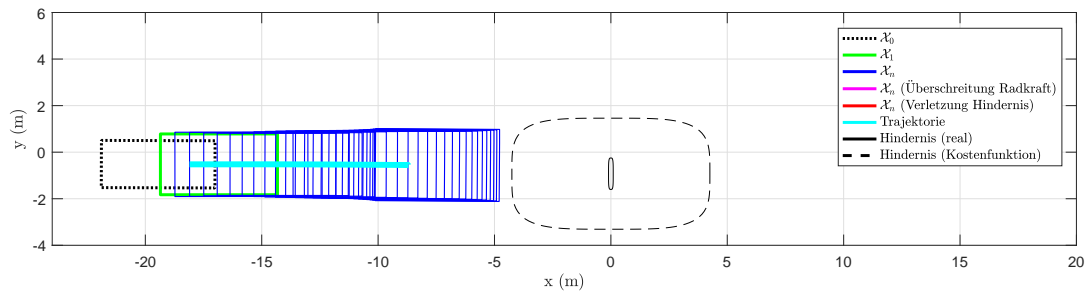
Abb. 52: Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie für alle untersuchten Datenpunkte aus dem Versuch von VP44 für 200 ms Vorausschauzeit

Sicherheitsfunktion mit beschränkter Beschleunigungsänderung durch den Fahrer mit einem Prädiktionsintervall der Länge 200 ms

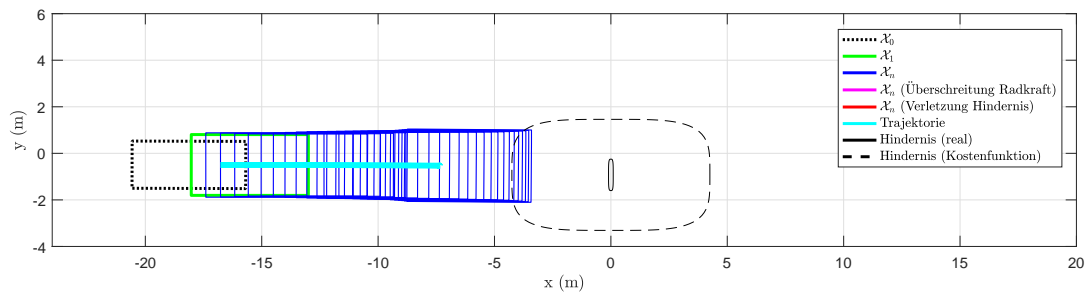
$$t_{d1} = 0.00 \text{ s}$$



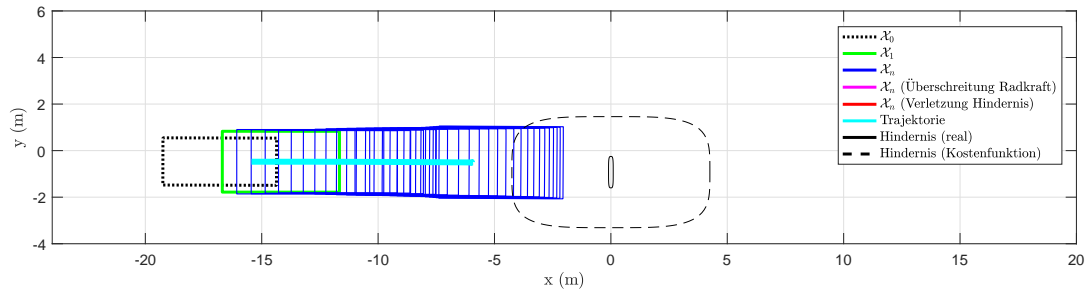
$$t_{d3} = 0.10 \text{ s}$$



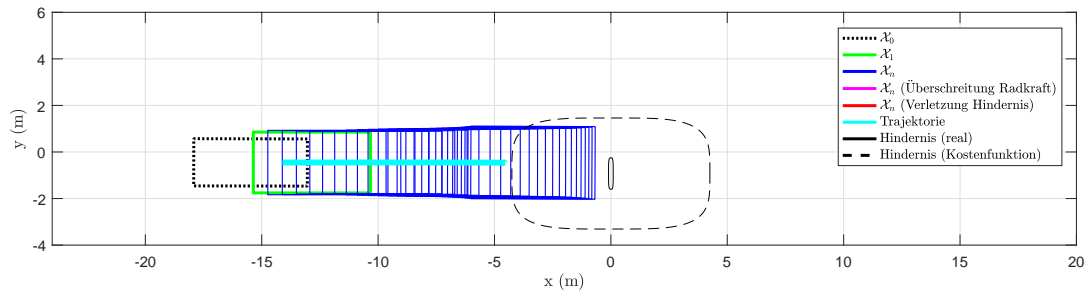
$$t_{d5} = 0.20 \text{ s}$$



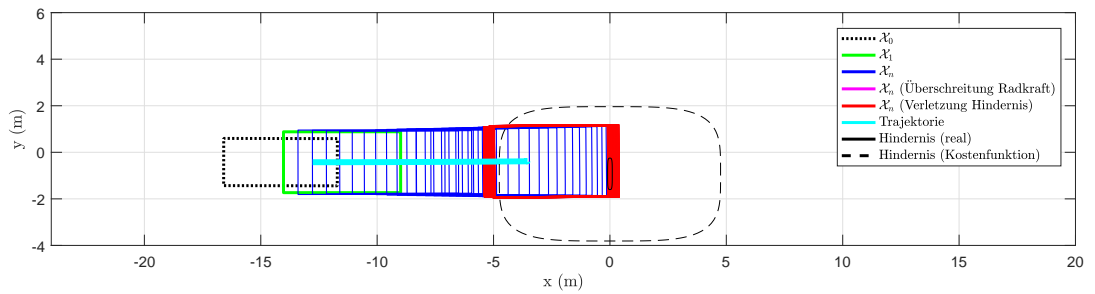
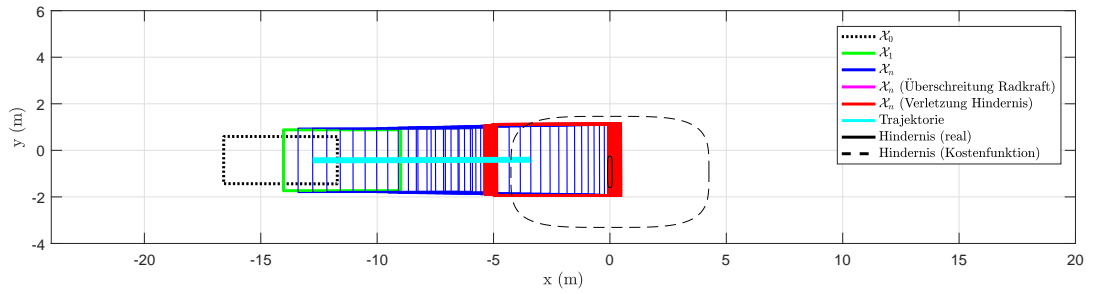
$$t_{d7} = 0.30 \text{ s}$$



$$t_{d9} = 0.40 \text{ s}$$



$$t_{d11} = 0.50 \text{ s}$$



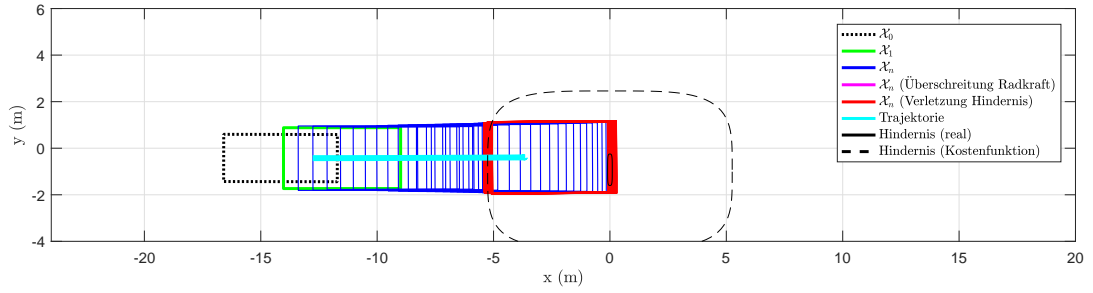
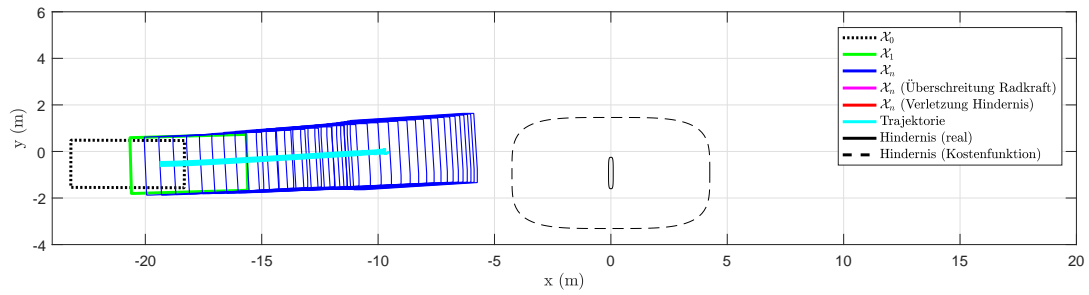


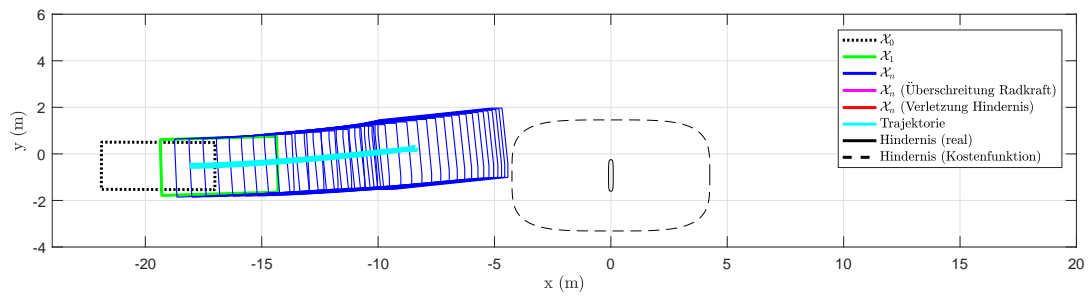
Abb. 53: Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie für alle untersuchten Datenpunkte aus dem Versuch von VP44 für beschränkte Beschleunigungsänderung des Fahrers und 200 ms Vorausschauzeit

Sicherheitsfunktion mit beschränktem Lenkbereich des Fahrers mit einem Prädiktionsintervall der Länge 200 ms

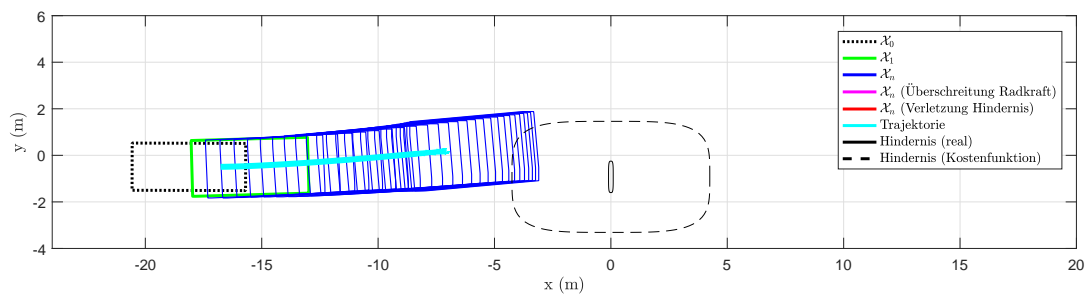
$$t_{d1} = 0.00 \text{ s}$$



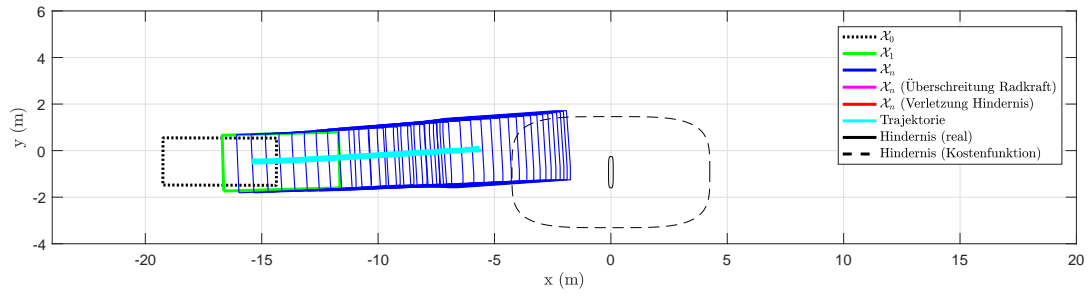
$$t_{d3} = 0.10 \text{ s}$$



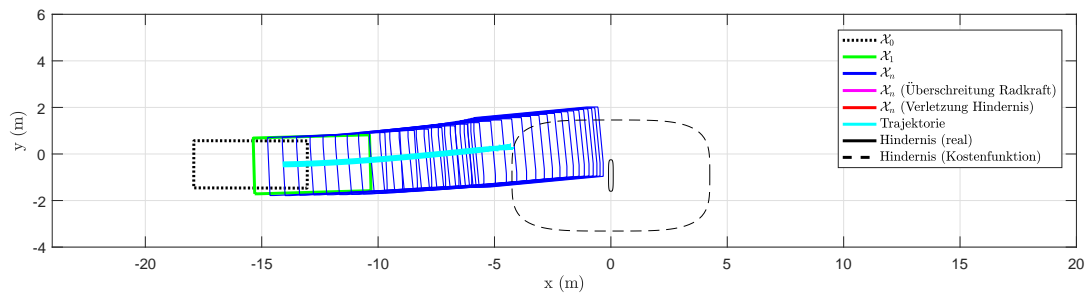
$$t_{d5} = 0.20 \text{ s}$$



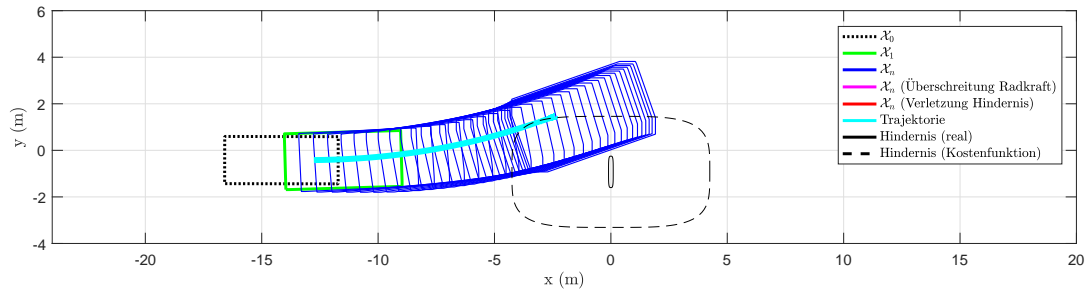
$$t_{d7} = 0.30 \text{ s}$$



$$t_{d9} = 0.40 \text{ s}$$



$$t_{d11} = 0.50 \text{ s}$$



$$t_{d12} = 0.55 \text{ s}$$

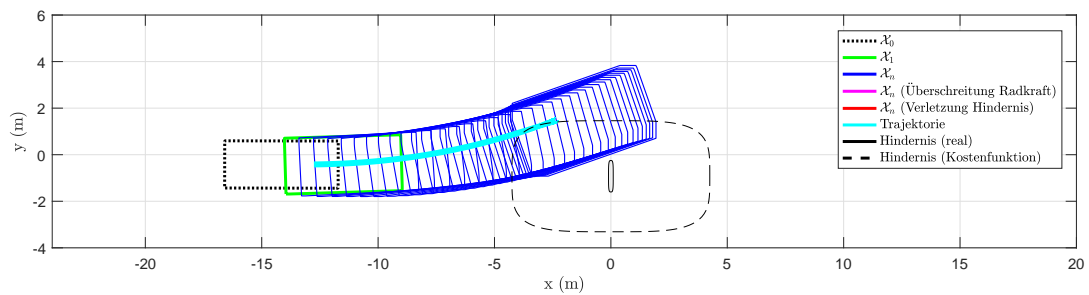


Abb. 54: Erreichbarkeitsmengen und Trajektorie für alle untersuchten Datenpunkte aus dem Versuch von VP44 für beschränkten Lenkbereich des Fahrers und 200 ms Vorausschauzeit

D Ergebnisse und Grund der Beendigung der Simulation für alle Datensätze

In dieser Arbeit wurden die 45 vorhandenen Datensätze des Realversuches aus dem EU-Projekt interactIVe jeweils für die Sicherheitsfunktion mit einem Fahrer-Prädiktionsintervall der Länge 100 ms, für die Sicherheitsfunktion mit einem Fahrer-Prädiktionsintervall der Länge 200 ms und für die Sicherheitsfunktion mit beschränktem Lenkbereich des Fahrers und einem Prädiktionsintervall der Länge 200 ms ausgewertet. Die folgenden Tabellen listen für alle Datensätze jeweils für alle Untersuchungsarten das Ergebnis und den Grund der Beendigung der Simulation auf. Die unterschiedlichen Testgruppen in der Realstudie *Assistiert mit stets eingekoppeltem Fahrer*, *Assistenz mit ausgekoppeltem Fahrer* und *Kontrollgruppe* werden in den Tabellen mit den Buchstaben E, A und K abgekürzt.

Tab. 11: Ergebnisse und Grund der Beendigung der Simulation für alle Datensätze für Auswertung mit der Sicherheitsfunktion mit einem Fahrer-Prädiktionsintervall der Länge 100 ms

Name	Testgr.	Auslösung Algorithmus	Grund der Beendigung
VP1	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP2	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP3	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP5	A	ja	ACADO Integrator Fehler
VP6	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP7	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP8	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP9	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP10	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP11	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP12	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP13	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP15	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP16	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP17	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP18	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP19	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP20	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht

VP21	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP22	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP23	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP24	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP25	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP26	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP27	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP28	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP29	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP30	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP31	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP32	E	ja	ACADO Integrator Fehler (am 2. Datenpunkt)
VP33	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP34	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP35	K	ja	ACADO Integrator Fehler (am 1. Datenpunkt)
VP36	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP37	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP38	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP39	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP40	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP41	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP42	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP43	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP44	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP45	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP46	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP47	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht

Tab. 12: Ergebnisse und Grund der Beendigung der Simulation für alle Datensätze für Auswertung mit der Sicherheitsfunktion mit einem Fahrer-Prädiktionsintervall der Länge 200 ms

Name	Testgr.	Auslösung Algorithmus	Grund der Beendigung
------	---------	-----------------------	----------------------

VP1	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP2	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP3	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP5	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht (am 1. Datenpunkt)
VP6	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP7	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP8	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP9	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht (am 1. Datenpunkt)
VP10	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP11	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP12	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht (am 1. Datenpunkt)
VP13	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP15	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP16	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP17	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht (am 1. Datenpunkt)
VP18	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht (am 1. Datenpunkt)
VP19	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP20	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP21	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP22	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP23	A	ja	ACADO Integrator Fehler (am 1. Datenpunkt)
VP24	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP25	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP26	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP27	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP28	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP29	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht (am 1. Datenpunkt)

VP30	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht (am 1. Datenpunkt)
VP31	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP32	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP33	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP34	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP35	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP36	E	ja	ACADO Integrator Fehler (am 1. Datenpunkt)
VP37	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP38	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht (am 1. Datenpunkt)
VP39	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht (am 1. Datenpunkt)
VP40	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP41	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP42	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht (am 1. Datenpunkt)
VP43	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP44	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP45	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP46	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP47	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht

Tab. 13: Ergebnisse und Grund der Beendigung der Simulation für alle Datensätze für Auswertung mit der Sicherheitsfunktion mit beschränktem Lenkbereich des Fahrers und einem Prädiktionsintervall der Länge 200 ms

Name	Testgr.	Auslösung Algorithmus	Grund der Beendigung
VP1	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP2	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP3	A	ja	ACADO Integrator Fehler (am 1. Datenpunkt)
VP5	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP6	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht

VP7	K	ja	ACADO Integrator Fehler (am 1. Datenpunkt)
VP8	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP9	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP10	E	ja	maximale Iterationen erreicht
VP11	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP12	E	ja	ACADO Integrator Fehler (am 1. Datenpunkt)
VP13	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP15	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP16	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP17	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP18	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP19	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP20	K	ja	ACADO Integrator Fehler (am 1. Datenpunkt)
VP21	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP22	A	ja	ACADO Integrator Fehler (am 1. Datenpunkt)
VP23	A	ja	maximale Iterationen erreicht
VP24	A	ja	ACADO Integrator Fehler (am 1. Datenpunkt)
VP25	K	ja	maximale Iterationen erreicht
VP26	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP27	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP28	A	ja	ACADO Integrator Fehler (am 1. Datenpunkt)
VP29	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP30	K	ja	ACADO Integrator Fehler (am 1. Datenpunkt)
VP31	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP32	E	ja	ACADO Integrator Fehler (am 1. Datenpunkt)
VP33	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht

VP34	A	ja	ACADO Integrator Fehler (am 1. Datenpunkt)
VP35	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP36	E	ja	maximale Iterationen erreicht
VP37	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP38	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP39	K	ja	ACADO Integrator Fehler (am 1. Datenpunkt)
VP40	E	ja	ACADO Integrator Fehler (am 1. Datenpunkt)
VP41	A	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP42	E	ja	ACADO Integrator Fehler (am 1. Datenpunkt)
VP43	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP44	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP45	A	ja	ACADO Integrator Fehler (am 1. Datenpunkt)
VP46	K	ja	CORA Rekursionslimit erreicht
VP47	E	ja	CORA Rekursionslimit erreicht

E Datenträger

Auf dem beigefügten Datenträger befinden sich die folgenden Ordner und Dateien:

- Der Quellcode des Sicherheitsalgorithmus
- Die Plots aller ausgewerteten Datensätze
- Alle zur Erstellung dieser Arbeit genutzten Quellen, die in digitaler Form vorliegen
- Eine digitale Version dieser Arbeit im Format .pdf